

Wacław WITTCHEN, Mariusz BORECKI

Instytut Metalurgii Żelaza

Bogusław WIĘCEK, Krzysztof PACHOLSKI, Robert OLBRYCHT, Robert STRĄKOWSKI

Politechnika Łódzka

MULTISPEKTRALNY SYSTEM POMIAROWY DO OKREŚLENIA PARAMETRÓW ŻUŻLA STALOWNICZEGO PODCZAS SPUSTU STALI Z PIECA HUTNICZEGO DO KADZI ODLEWNICZEJ

Przedstawiono wyniki projektu badawczego, o charakterze interdyscyplinarnym, dotyczącego opracowania metody oraz wielospektralnego systemu pomiarowego do oceny zawartości tlenku żelaza w żużlu stalowniczym, podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi odlewniczej. Parametr ten ma istotne znaczenie w procesie dalszego wytwarzania stali. Realizowany projekt oparty był na założeniu, że na podstawie charakterystyk promieniowania żużla podczas spustu stali z pieca do kadzi, rozkładu temperatury wzdłuż strugi oraz innych parametrów procesu metalurgicznego można ocenić zawartość tlenku żelaza (FeO) w żużlu stalowniczym. Do realizacji tego celu zaproponowano między innymi wykorzystanie kamer termowizyjnych, które coraz częściej są instalowane w wielu zakładach metalurgicznych do detekcji żużla podczas spustu stali. W ramach projektu opracowano metodykę oraz oprogramowanie komputerowe pozwalające na wyznaczenie parametrów promieniowania, które wraz z emisyjnością charakteryzują żużel stalowniczy. Wartości tych parametrów wyznaczone były za pomocą obróbki statystycznej obrazów strugi stali i żużla przy użyciu wielospektralnego systemu pomiarowego wykorzystującego dwie kamery termowizyjne (średniofalową i długofalową) w zakresie promieniowania podczerwonego oraz aparatu RGB dokonującego rejestracji obrazów w paśmie światła widzialnego. Do klasyfikacji i aproksymacji danych pomiarowych są wykorzystywane sztuczne sieci neuronowe, gdzie wartość wyjściowa odpowiada zawartości tlenku żelaza w żużlu stalowniczym, pojawiającym się podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi.

Słowa kluczowe: żużel stalowniczy, współczynnik emisyjności, termowizja, sieci neuronowe, system wielospektralny

MULTISPECTRAL MEASURING SYSTEM FOR DETERMINATION OF STEEL SLAG PARAMETERS DURING STEEL TAPPING FROM METALLURGICAL FURNACE TO CASTING LADLE

This article presents results of the multidisciplinary research project for development of the method and multi-spectral measuring system for evaluation of ferric oxide content in steel slag during steel tapping from metallurgical furnace to casting ladle. This parameter is essential during further steelmaking process. The project relied on the assumption that ferric oxide (FeO) content in steel slag could be evaluated on the basis of slag radiation characteristics during steel tapping from furnace to ladle, temperature distribution along the stream and other metallurgical process parameters. To accomplish this objective, it was proposed, among other things, to use thermal cameras, which are more and more often installed in many metallurgical plants for slag detection during steel tapping. Under the project, the methodology and computer software were developed to allow the determination of radiation parameters, which, together with emissivity, characterise steel slag. The values of these parameters were determined by static treatment of steel and slag stream images using the multispectral measuring system with two infrared radiation thermal cameras (medium- and long-wave) and the RGB device to record images in the visible light band. For classification and approximation of measuring data the artificial neural networks are used where the initial value corresponds to ferric oxide content in steel slag that occurs during steel tapping from metallurgical furnace to ladle.

Key words: steel slag, emission factor, thermovision, neural networks, multispectral system

1. WPROWADZENIE

Idea projektu oparta była na założeniu, że na podstawie charakterystyk promieniowania żużla podczas spustu stali z pieca do kadzi, rozkładu temperatury wzdłuż strugi oraz innych parametrów procesu metalurgiczne-

go można ocenić zawartość tlenku żelaza (FeO) w żużlu stalowniczym [1].

Niższa od stali gęstość żużla powoduje, że jego warstwa tworzy się na powierzchni metalu. W czasie spustu dąży się, aby żużel powstały w piecu stalowniczym nie przedostawał się do kadzi odlewniczej. W przy-

padku gdy do tego dojdzie, ważna jest znajomość jego podstawowych parametrów w tym zawartości tlenku żelaza [2, 3].

Stężenie FeO w żużlu ma w procesach stalowniczych bardzo istotne znaczenie, a co za tym idzie znajomość tego parametru ułatwia stosowanie adekwatnych procedur technologicznych i poprawia jakość procesu produkcyjnego. Wartość tego parametru w wielu przypadkach celowo zmienia się w trakcie wytapiania stali, gdyż w poszczególnych etapach jej produkcji realizowane są różne cele, a co za tym idzie konieczne jest innego rodzaju oddziaływanie żużla na stal.

Przykładowo obecność FeO w żużlu sprzyja odosforowaniu stali. Z tego względu stal odosforowuje się zwykle podczas świeżenia, gdyż w tym czasie żużel jest bogaty w tlenek żelaza. Ponadto FeO ułatwia rozpuszczania się wapna w żużlu, a tym samym zwiększa szybkość procesów żużlotwórczych oraz umożliwia osiągnięcie wyższej zasadowości. Pożądana zawartość FeO w żużlu konwertorowym wynosi przynajmniej kilkanaście, a często więcej, procent.

Odmienne wymagania obowiązują dla żużla podczas obróbki pozapiecowej. W tym etapie produkcji dąży się do eliminowania FeO z żużla. Zwykle przyjmuje się, że żużel podczas obróbki pozapiecowej nie powinien zawierać więcej niż $1,5 \div 2\%$ FeO + MnO, (w obróbce pozapiecowej FeO zwykle bilansowany jest łącznie z MnO). Pożądana niska zawartość tych tlenków w żużlu wynika z konieczności odtlwienia i odsiarczenia stali podczas obróbki pozapiecowej.

Spust stali z konwertora stanowi granicę pomiędzy dwoma odmiennymi operacjami metalurgicznymi i tym samym odmiennymi sposobami rafinacji stali. Odcięcie żużla konwertorowego, a w przypadku niepełnej skuteczności tego zabiegu oszacowanie, ile FeO przedostało się do kadzi, ma fundamentalne znaczenie dla przebiegu procesu obróbki pozapiecowej. Znajomość masy FeO, który przedostał się do kadzi spustowej pozwala na optymalizację operacji odtlwienia żużla i co za tym idzie zużycia odtleniaczy, a tym samym wpływa na koszty produkcji i czystość metalurgiczną wytapianej stali.

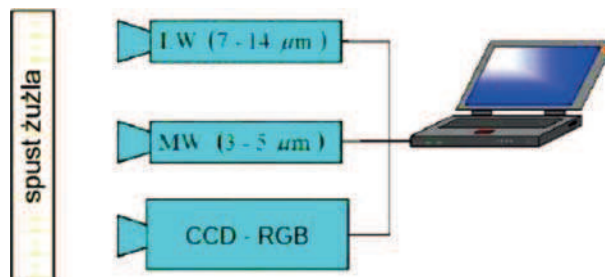
Głównymi celami prowadzonych badań było:

- opracowanie wielospektralnego systemu pomiarowego składającego się z dwóch kamer termowizyjnych, pracujących w zakresie promieniowania podczerwonego (krótko i długofalowej) oraz z szerokopasmowej kamery CCD – RGB do badań w świetle widzialnym,
- opracowanie nowej metody oceny zawartości tlenku żelaza (FeO) w żużlu stalowniczym poprzez pomiar i analizę promieniowania w różnych pasmach zarówno w podczerwieni, jak i w świetle widzialnym z wykorzystaniem sieci neuronowych.

Projekt miał charakter interdyscyplinarny i był realizowany przez dwie jednostki naukowe – Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej (Wydział Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki) oraz Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach.

Badania prowadzone były przy użyciu dwóch kamer termowizyjnych pracujących w pasmach podczerwieni: długofalowym LW ($7,5 \div 13 \mu\text{m}$) oraz średniofalowym MW ($3 \div 5 \mu\text{m}$). Dodatkowo wykorzystano szerokopasmową kamerę CCD – RGB do badań żużla w zakresie światła widzialnego.

Na wstępnym etapie badań stosowano również kamerę bliskiej podczerwieni NIR pracującą w zakresie $0,8 \div 1,2 \mu\text{m}$, która okazała się zbyt czuła do tego rodzaju badań. Ze względu na brak odpowiednich filtrów zrezygnowano ze stosowania kamery NIR na tym etapie badań. Uproszczony schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat multispektralnego systemu do badań zawartości FeO w żużlu [1]

Fig. 1. Diagram of multispectral system for measuring FeO content in slag [1]

Wyniki badań intensywności promieniowania elektromagnetycznego we wszystkich badanych pasmach, w wybranych obszarach strugi żużla, wraz z innymi parametrami promieniowania stanowiły zbiór danych wejściowych dla sieci neuronowej. Sieć neuronowa, po wstępnym etapie uczenia, działała jak aproksymator procesu technologicznego i na podstawie wartości parametrów promieniowania żużla dla różnych przedziałów widmowych, była w stanie oszacować stężenie FeO w żużlu [1].

Należy wspomnieć, że do wykrywania i „odcinania” żużla podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi stosuje się wiele rozmaitych sposobów, ale żaden z nich nie zyskał uniwersalnego zastosowania [4]. W ostatnich latach XX wieku została opracowana i wdrożona do praktyki przemysłowej nowa skuteczna i bezkontaktowa metoda wykrywania żużla przy spuście stali z pieca hutniczego do kadzi oparta na pomiarze termowizyjnym [5–8].

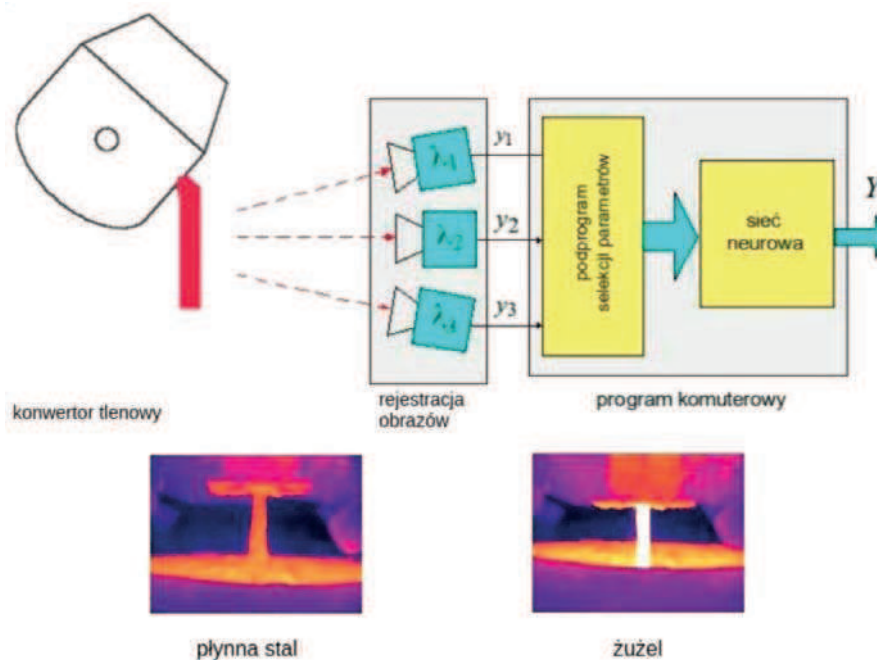
Zdaniem autorów niniejszej publikacji celowe jest rozszerzenie termowizyjnych systemów detekcji żużla o nowe funkcje celem uzyskania rozszerzonych informacji o właściwościach żużla stalowniczego [1, 3, 9–17].

2. SZACOWANIE FEO W ŻUŻLU STALOWNICZYM NA PODSTAWIE PARAMETRÓW PROMIENNYCH Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

Do oceny zawartości FeO w żużlu stalowniczym pojawiającym się podczas spustu stali z konwertora tlenowego do kadzi stalowniczej wykorzystano kamery termowizyjne tworzące system wizyjny i termalny. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego do oceny zawartości FeO w żużlu stalowniczym.

Zaprojektowano i wykonano trzykanałowy system obrazowy zawierający:

- niechłodzoną długofalową kamerę termowizyjną FLIR SC660 pracującą w zakresie widmowym λ_1



Płynna stal oraz żużel pojawiający się w otworze spustowym
 (λ_1 , λ_2 – kamery termowizyjne długo i średniofalaowa, λ_3 – kamera optyczna RGB)

Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego do oceny zawartości FeO w żużlu stalowniczym [13]

Fig. 2. Flow chart of measuring system for evaluation of FeO content in steel slag [13]

($7,5 \div 13,0 \mu\text{m}$, określanym mianem LWIR – ang. *Long-Wavelength InfraRed*),

- chłodzoną średniofalaową kamerą termowizyjną CEDIP Titanium pracującą w zakresie widmowym λ_2 (3 do $5 \mu\text{m}$, określanym mianem MWIR – ang. *Medium-Wavelength InfraRed*); ze względu na wysoką wartość temperatury obserwowanej strugi stali i żużla, kamera ta pracowała w trybie pasmowego tłumienia części energii promieniowania podczerwonego, jednocześnie ograniczając zakres widmowy kamery do wartości $4 \mu\text{m}$,
- cyfrowy aparat fotograficzny z matrycą RGB typu DSLR (ang. *Digital Single Lens Reflex*) Nikon D5100 z obiektywem Nikkor $55 \div 300 \text{ mm}$, pracujący w zakresie widmowym światła widzialnego λ_3 ($380 \div 740 \text{ nm}$). Wykorzystano fakt, iż matryca światłoczuła CMOS w tym aparacie zawiera ułożone w mozaikę Bayera filtry przepuszczające tylko odpowiednio światło czerwone, zielone lub niebieskie. Dzięki temu możliwe było rejestrowanie trzech niezależnych obrazów – osobno dla każdej z tych składowych.

W skład systemu pomiarowego wchodzi również komputery z oprogramowaniem dedykowanym do rejestracji obrazów z wyżej wymienionych kamer.

Dodatkowo w skład systemu wchodziło oprogramowanie „Slagizer”, które specjalnie na potrzeby projektu zostało napisane w środowisku *Matlab*, umożliwiając między innymi analizę zarejestrowanych obrazów z wykorzystaniem sieci neuronowej [1, 13, 15].

Zdjęcie opracowanego systemu pomiarowego podczas badań testowych w warunkach przemysłowych przedstawiono na rysunku 3.

W celu prawidłowego przeprowadzenia badań opracowano odpowiednie kryteria, takie jak: założenia logistyczne i metodyczne wykonania badań, odpowiednią procedurę rejestracji termogramów, wybór ramek obrazów do analizy, wybór obszaru zainteresowania



Rys. 3. System pomiarowy w warunkach przemysłowych w trakcie badań testowych [10]

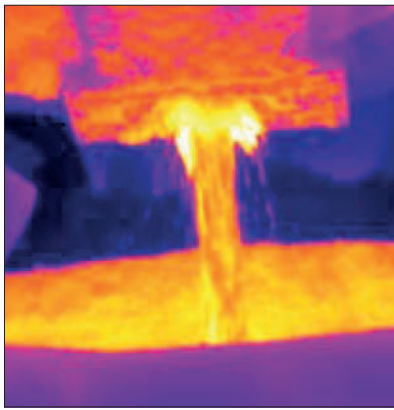
Fig. 3. Measuring system under industrial conditions during testing [10]

na zarejestrowanych termogramach, ocena korelacji emisyjności spektralnej żużla z zawartością FeO oraz selekcje cech promieniowania żużla [1, 15].

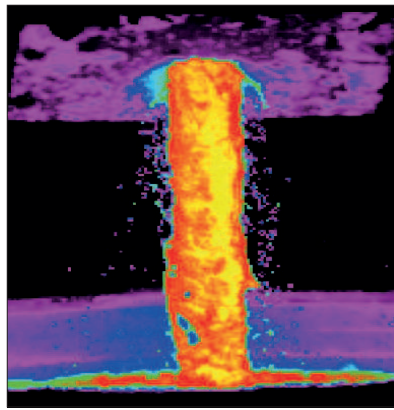
Poniżej przedstawiono główne wymagane kryteria, które są niezbędne dla opracowania metody i wielospektralnego systemu pomiarowego do szacowania właściwości żużla hutniczego, a w szczególności zawartości w nim FeO [1].

PROCEDURA REJESTRACJI OBRAZU

Dla każdego monitorowanego wytopu dokonywano rejestracji równocześnie z dwóch kamer termowizyjnych. Istotne jest, aby rejestracja obejmowała ostatnią fazę spustu, w momencie pojawienia się żużla w otworze spustowym.



a) Obraz z kamery termowizyjnej w zakresie długofalowym



b) Obraz z kamery termowizyjnej w zakresie średniofalowym



c) Obraz z aparatu RGB w zakresie światła widzialnego

Rys. 4. Przykładowe obrazy strugi zarejestrowane z użyciem różnych systemów rejestracji [1]

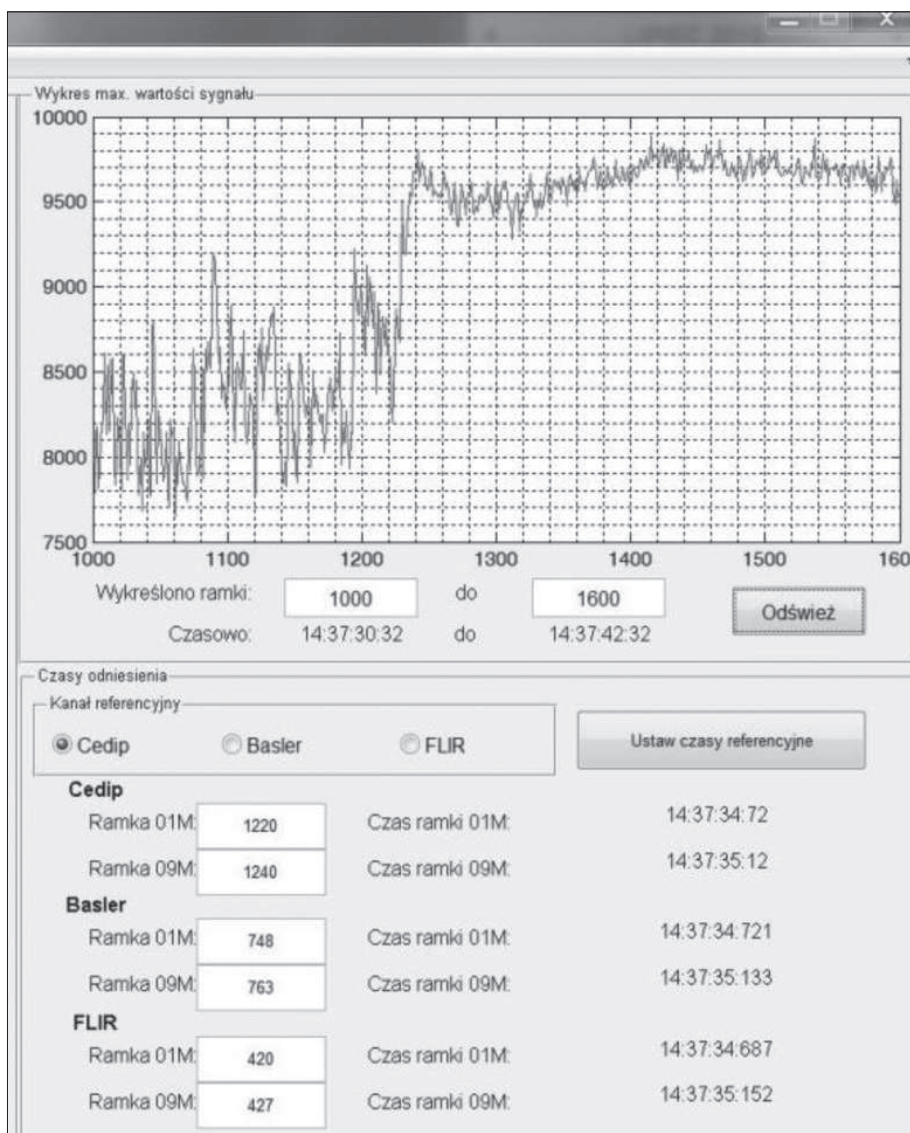
Fig. 4. Examples of stream images recorded with different systems [1]

Moment pojawienia się żużla jest identyfikowany jako skokowy przyrost temperatury monitorowanej strugi, co jest widoczne na rysunku 5.

Przyczyną tej zmiany jest wartość współczynnika emisyjności żużla pojawiającego się w otworze spustowym

podczas spustu stali, która jest wyższa od wartości współczynnika emisyjności stali nawet przy jednakowej wartości temperatury stali i żużla.

Przykładowe obrazy strugi zarejestrowane z użyciem opisywanego systemu przedstawiono na rysunku 4,



Rys. 5. Okno dialogowe programu Slagizer do określenia referencyjnego czasu pomiaru [1]

Fig. 5. Dialog box of Slagizer program for determination of reference data at a specific point of measurement [1]

odpowiednio dla zakresu spektralnego a) λ_1 (LWIR), b) λ_2 (MWIR), c) λ_3 (światła widzialnego).

Ze względu na konieczność obróbki danych pomiarowych pochodzących z różnych źródeł rejestracji konieczne jest, aby ich rejestracja była zsynchronizowana.

Z tego powodu bezpośrednio przed każdymi badaniami w warunkach przemysłowych, zegary wszystkich urządzeń były synchronizowane z serwerem czasu *vega.cbk.poznan.pl* [150.254.183.15], dla którego źródłem jest atomowy zegar cezowy 5071A CBK w Borówcu k. Poznania. Dodatkowo brano pod uwagę czas urządzeń rejestracyjnych wydziału produkcyjnego, gdzie przeprowadzano badania.

WSTĘPNA OBRÓBKA DANYCH POMIAROWYCH

Po zarejestrowaniu sekwencji termogramów danego wyciupu dwoma kamerami termowizyjnymi oraz aparatem RGB należy **zweryfikować synchronizację otrzymanych nagrań w czasie**. Do realizacji tego celu jest wykorzystywane oprogramowanie „Slagizer”, które umożliwia prezentację przebiegu wartości maksymalnej temperatury w czasie dla każdego kanału, co przedstawiono na rysunku 5. Program ten pozwala na automatyczny wybór ramek (termogramów) dla każdego spustu stali przeznaczanego do wieloparametrycznej analizy statystycznej celem szacowania zawartości FeO w żuźlu stalowniczym w danym czasie pomiaru.

Po określeniu analizy czasowej sekwencji rejestrowanych termogramów występuje konieczność **zdefiniowania rejonu zainteresowania**, który zostanie poddany analizie. Na każdym termogramie widoczna jest nie tylko struga metalu lub żuźła w trakcie spustu

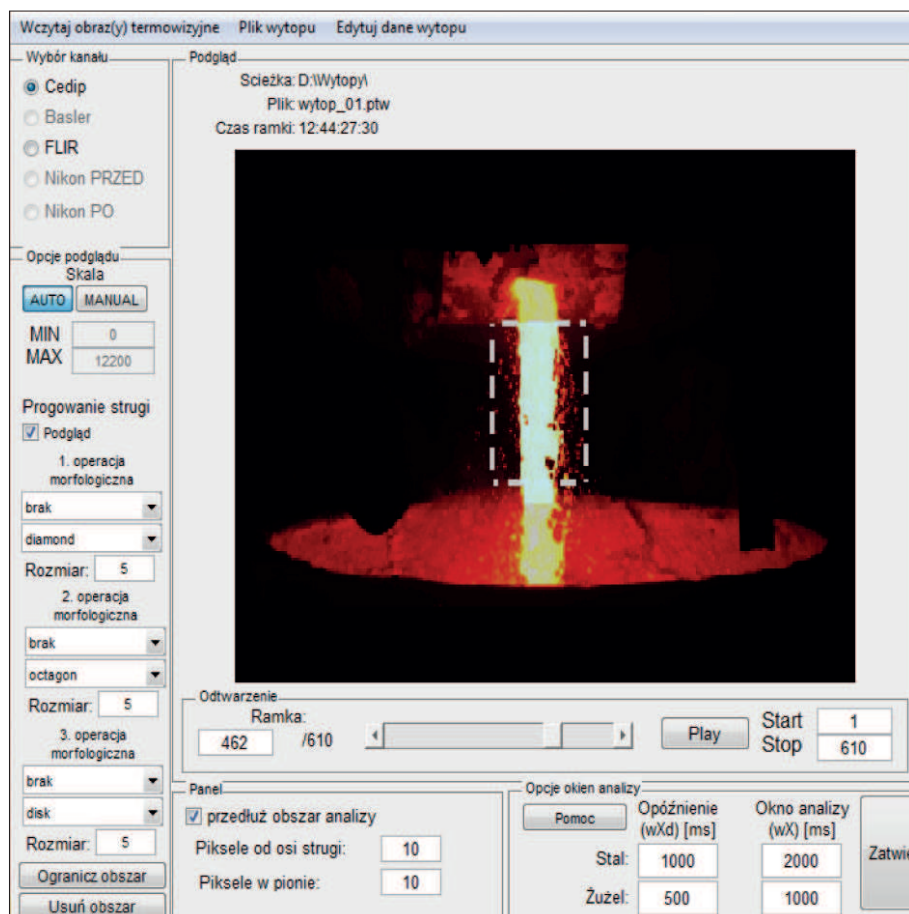
stali, ale również inne niepożądane elementy takie jak kadź, fragment konwertora i inne. Z tego powodu do wieloparametrycznej analizy statystycznej należy wybrać obszar zainteresowania ROI (Region of Interest), który obejmuje jedynie fragment strugi na zimnym tle. Zaznaczony rejon zainteresowania mający kształt prostokąta znajduje się pomiędzy otworem spustowym konwertora a kadzią stalowniczą. Na podstawie zdefiniowanego obszaru oprogramowanie dokonuje detekcji strugi stali i żuźła dla każdej ramki okna pomiarowego. Detekcja strugi odbywa się poprzez binaryzację obrazu z progiem wyznaczonym za pomocą metody Otsu [1].

Użytkownik programu ma możliwość między innymi zmiany zadawanych parametrów, takich jak górny i dolny próg sygnału detekcji strugi, oraz typ, kształt i rozmiar elementów strukturujących używanych w operacjach morfologicznych. Przykładowy obraz detekcji w oknie interfejsu graficznego oprogramowania „Slagizer” przedstawiono na rysunku 6.

Ponadto założono, że liczba pikseli wyodrębniona przez obszar pomiarowy nie powinna być mniejsza od 400. Taka liczba pikseli gwarantuje dużą wiarygodność wyników analizy statystycznej niezbędnej do wyznaczenia parametrów promieniowania przeznaczonych do identyfikacji zawartości FeO w żuźlu stalowniczym.

WYZNACZANIE PARAMETRÓW PROMIENIOWANIA ORAZ ICH SELEKCJA Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

W trakcie badań, jako główne parametry promieniowania żuźła charakteryzujące zawartość FeO w jego składzie, uwzględniono współczynniki emisyjności wyznaczane na podstawie pomiarów termowizyjnych w



Rys. 6. Okno interfejsu użytkownika programu „Slagizer” do określenia obszaru strugi oraz ustawiania parametrów jego „progowania” [1]

Fig. 6. User interface window of Slagizer program for determination of stream area and setup of its threshold parameters [1]

zakresie średniofalowym i długofalowym podczerwieni. Oprócz emisyjności, za pomocą wieloparametrycznej analizy statystycznej wyselekcjonowano dodatkowe parametry promieniowania rejestrowanych termogramów skorelowane z zawartością FeO w żużlu, pojawiającym się w końcowej fazie spustu stali z konwertorów tlenowych.

Do oceny skorelowania emisyjności żużla zarówno dla średnio i długofalowego zakresu widma podczerwieni, z procentową zawartością FeO w jego składzie, wykorzystano metody analizy statystycznej [1].

Po wstępnej obróbce danych pomiarowych, takich jak określenie okien czasowych oraz wybór obszaru zainteresowania następuje analiza danych pomiarowych i obliczenie cech promieniowania żużla. W tym celu uruchamiany jest moduł cech oprogramowania „Slagizer”, który za pomocą informacji wprowadzonych przez operatora w poprzednim etapie dokonuje ekstrakcji wszystkich ramek pomiarowych i detekcji obszaru strugi. Następnie dla każdego okna pomiarowego oraz dla każdego kanału obliczane są dwa zestawy parametrów: pierwotne i wtórne.

Parametry pierwotne opisują statystycznie rozkład temperatury/sygnалу w wyznaczonym automatycznie obszarze strugi i są obliczane dla pojedynczej ramki obrazu.

Obliczane parametry pierwotne to: wielkość obszaru w pikselach (P1,fi), wartość średnia 100 pikseli o największej intensywności promieniowania (P2,fi), wartość maksymalna ze 100 pikseli o największej intensywności promieniowania (P3,fi), wartość minimalna ze 100 pikseli o największej intensywności promieniowania (P4,fi), wartość średnia (P5,fi), mediana (P6,fi), dominanta (P7,fi), wartość maksymalna (P8,fi), wartość minimalna (P9,fi), wariancja (P10,fi), odchylenie standardowe (P11,fi), kurtoza (P12,fi), skośność (P13,fi), stosunek mediany do średniej (P14,fi), entropia (P15,fi), współczynniki a i b prostej trendu (P16,fi i P17,fi).

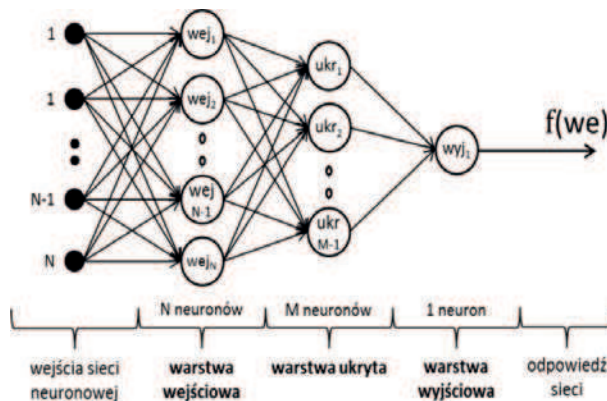
Parametry wtórne są obliczane jako cechy opisujące zmiany każdego z parametrów pierwotnych z kolejnych ramek obrazu dla każdego okna pomiarowego danego wytopu. Obliczane parametry wtórne to: wartość średnia (S1,k), mediana (S2,k), wartość maksymalna (S3,k), wartość minimalna (S4,k), wariancja (S5,k), odchylenie standardowe (S6,k), kurtoza (S7,k), stosunek mediany do średniej (S8,k), suma modułów zmian wartości parametru $P_{fi,k}$ pomiędzy kolejnymi ramkami (S9,k), średnia modułów zmian wartości parametru $P_{fi,k}$ pomiędzy kolejnymi ramkami (S10,k), wariancja modułów zmian wartości parametru $P_{fi,k}$ pomiędzy kolejnymi ramkami (S11,k)

Parametry wtórne nie były obliczane dla kanału pomiarowego aparatu fotograficznego pracującego w świetle widzialnym. Dla każdej składowej RGB do analizy są uwzględniane tylko dwa obrazy tj. stal i żużel.

Po wyznaczeniu parametrów wtórnych dla obu okien pomiarowych pojedynczego wytopu obliczana jest macierz wtórnych parametrów różnicowych, której wartości równe są różnicy parametrów wtórnych okna stali i żużla.

Końcowym wynikiem procedury jest 1200 parametrów, będących cechami promieniowania żużla stałowniczego dla analizowanego wytopu. Dodatkowo do każdego wytopu dodawane są dwa parametry emisyjności.

Do klasyfikacji i aproksymacji danych pomiarowych zastosowano sztuczne sieci neuronowe. Uproszczonego schematu zastosowanej w badaniach sieci neuronowej przedstawiono na rysunku 7. Opracowana sieć neuronowa posiada jeden neuron w warstwie wyjściowej, którego wartość wyjściowa odpowiada szacowanej zawartości FeO w żużlu.

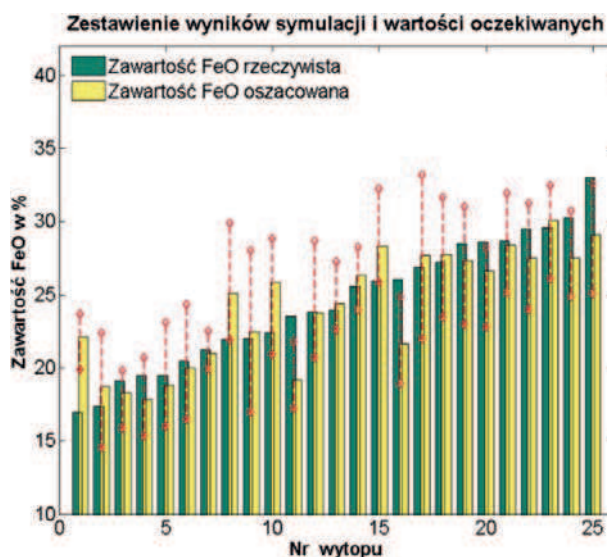


Rys. 7. Uproszczonego schematu jednokierunkowej, wielowarstwowej sieci neuronowej wykorzystanej podczas badań [1]

Fig. 7. Simplified diagram of one-way multilayer neural network used for testing [1]

Jako przykład wykorzystania metody można podać, że po dwudziestu pięciu symulacjach uczenia sieci bezwzględny, średni błąd wyznaczania zawartości FeO w żużlu dla wszystkich wytopów wyrażony w punktach procentowych osiągnął wartość 1,75 pkt. %.

Przykładowe porównanie rzeczywistych (zmierzonych w laboratorium chemicznym) wartości FeO w żużlu z wartościami wyznaczonymi za pomocą opisywanego w publikacji programu zostało przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Zestawienie rzeczywistych wartości FeO w żużlu z wartościami wyznaczonymi za pomocą programu „Slagizer” [15]

Fig. 8. Summary of real values of FeO content in slag with values determined using Slagizer program [15]

Biorąc pod uwagę wahania zawartości FeO w żużlu wynoszące od około 17% do około 33% średni błąd wyznaczania zawartości FeO na poziomie 1,75 pkt. % nale-

zy uznać za satysfakcjonujący. Szacowana z takim błędem zawartość FeO w żużlu może pozwolić na znacznie dokładniejsze planowanie operacji odtleniania żużla i stali podczas obróbki pozapiecowej. W ramach projektu wykonano jedynie próby testowe. Badania przemysłowe nie były w planie projektu, który był realizowany bez formalnego udziału partnera przemysłowego. System może znaleźć zastosowania w stalowniach konwertorowych i elektrycznych do oceny procesu piecowego oraz do planowania obróbki pozapiecowej.

3. PODSUMOWANIE

Do oceny zawartości tlenku żelaza w żużlu stalowniczym podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi odlewniczej opracowano i wykorzystano multispektralny system pomiarowy oparty na wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego w zakresie podczerwieni oraz światła widzialnego. W systemie tym wykorzystuje się dwie kamery termowizyjne pracujące w różnych zakresach podczerwieni, to jest krótkofalowym w zakresie spektralnym 2 do 5 μm i średniofalowym w zakresie spektralnym 8 do 12 μm oraz aparat fotograficzny z matrycą RGB do pomiarów w świetle

widzialnym. Do analizy rejestrowanych obrazów wykorzystuje się specjalne oprogramowanie analizujące, które szacuje zawartość FeO w żużla stalowniczym podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi.

Do identyfikacji i aproksymacji danych pomiarowych są wykorzystywane sztuczne sieci neuronowe, gdzie wartość wyjściowa odpowiada zawartości tlenku żelaza w żużlu stalowniczym.

W dalszych planach rozważa się rozbudowę systemu o kamerę NIR po dobraniu odpowiednich filtrów. Systemy takie po odpowiednich testach i uzyskaniu zadawalających wyników, mogłyby być wdrażane zarówno w stalowniach konwertorowych jak i elektrycznych.

Publikacja została opracowana na podstawie wyników pracy wykonanej w projekcie badawczym nr N N505 485340 pt. „Opracowanie metody i wielospektralnego systemu pomiarowego do szacowania właściwości żużla hutniczego” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju”, realizowany przez Politechnikę Łódzką – Wydział Elektroniki, Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki (koordynator) oraz Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach.

LITERATURA

- Więcek B., Pacholski K., Wittchen W., Borecki M., Olbrycht R., Strąkowski R.: Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego – Opracowanie metody i wielospektralnego systemu pomiarowego do szacowania właściwości żużla hutniczego, Łódź, 2013
- Holtzer M.: Podstawy metalurgiczne i odlewnicze stopów żelaza – podstawy fizykochemiczne, PWN, Warszawa, 2013
- Więcek B., Świątczak T., Olbrycht R., Wittchen W., Borecki M.: Badanie emisyjności żużla stalowniczego w zakresie podczerwieni MWIR i LWIR, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 55, nr 11, 2009, s. 914-918
- Bulkowski L., Zdonek B., Kostro J., Olszowski S.: Przegląd i ocena skuteczności powszechnie stosowanych i nowych sposobów odcinania żużla konwertorowego, Prace IMŻ, 1998, nr 4, s. 25-29
- Zahorski F., Specht V.: Schlackenerkennung auf Infrarotbasis mit einem Schlackedekontions-system, Stahl u. Eisen, 1999, t.119, Nr 11, s. 61-63
- Goldstein D.A., Sharan A., Stofanek J.A.: Infrared Imaging for BOF Slag Detection, Iron a. Stelmaker, 2000, t. 27, nr 7, 2000, s. 31-38
- Rau H., Ropenack I.: Application of thermographic slag detection, MPT International, Nr 1, 2002, s. 52-55
- Bulkowski L., Wittchen W., Stecko J., Borecki M.: Wykorzystanie metody termowizyjnej do detekcji i odcinania żużla podczas spustu stali w procesie hutniczym, V Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni, s. 359-362, Ustroń 14-16.11.2002
- Wittchen W., Borecki M.: Opracowanie metodyki badań termowizyjnych w warunkach przemysłowych, Sprawozdanie IMŻ nr B0-1333-01, 2011, niepublikowane
- Wittchen W., Borecki M., Szypuła I.: Wykonanie pomiarów termowizyjnych żużla stalowniczego w trakcie spustu stali z pieca hutniczego w zakresie długofalowym, Sprawozdanie IMŻ nr B0-1333-02, 2012, niepublikowane
- Wittchen W., Borecki M., Szypuła I.: Analiza i opracowanie wyników badań termowizyjnych żużla stalowniczego, Sprawozdanie IMŻ nr B0-1333-03, 2013, niepublikowane
- Pacholski K., Więcek B., Wittchen W., Borecki M.: Wyznaczenie parametrów promiennych żużla stalowniczego do oceny jego właściwości metalurgicznych, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 57, nr 10, 2011, s. 1245-1248
- Strąkowski R., Pacholski K., Więcek B., Olbrycht R., Wittchen W., Borecki M.: Program do wyznaczania statystycznych cech promiennych żużla stalowniczego, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 59, nr 9, 2013, s. 985-988
- Wittchen W., Pacholski K., Borecki M., Olbrycht R., Więcek B., Strąkowski R.: Ilościowe Aspekty Zastosowania Termowizji w Podczerwieni w Hutnictwie, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 59, nr 9, 2013, s. 916-919
- Strąkowski R., Pacholski K., Więcek B., Olbrycht R., Wittchen W., Borecki M.: Radiative parameters of steel slag for FeO content estimation using multispectral thermography system, An International Journal on IR Thermography Quantitative InfraRed Thermography, Volumine 11, Number 2 December 2014, s. 222-232
- Więcek M., Strąkowski R., Więcek B., Olbrycht R., Świątczak T., Wittchen W., Borecki M.: Estimation of Steel Slag Parameters Using Thermal Imaging And Neural Networks Classification, 10th International Conference On Quantitative Infrared Thermography, QIRT 2010, Quebec, Laval University, July 27-30, s. 669-673
- Więcek B., Pacholski K., Świątczak T., Wittchen W., Borecki M.: Multispectral system for measuring the radiation parameters of steel slag during the discharge of steelworks furnace, 11th International Conference On Quantitative Infrared Thermography, QIRT 2010, Neapol – Włochy, 11-14.06-2012