

Wacław WITTCHEN¹, Mariusz BORECKI¹, Bogusław WIĘCEK², Krzysztof PACHOLSKI³, Robert OLBRYCHT², Robert STRĄKOWSKI²

¹ INSTYTUT METALURGII ŻELAZA IM. STANISŁAWA STASZICA, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

² INSTYTUT ELEKTRONIKI, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, Wólczńska 211/215, 90-924 Łódź

³ INSTYTUT SYSTEMÓW INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ, POLITECHNIKA ŁÓDZKA, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

Ilościowe aspekty zastosowania termowizji w podczerwieni w hutnictwie

Inż. Wacław WITTCHEN

Specjalista badawczo techniczny w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Jest Absolwentem Wydziału Metalurgicznego Politechniki Śląskiej. W pracy zawodowej zajmuje się głównie wykorzystywaniem techniki termowizyjnej w różnych dziedzinach głównie w hutnictwie. Autor lub współautor ponad stu prac badawczych i ekspertyz inżynierskich oraz kilkudziesięciu publikacji z zakresu stalownictwa a w szczególności wykorzystania termowizji.



e-mail: wwittchen@imz.pl

Dr inż. Mariusz BORECKI

Ukończył wydział Metalurgii Politechniki Śląskiej. Adiunkt w Zakładzie Badań Procesów Surowcowych Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Autor i współautor ponad stu prac badawczych z zakresu stalownictwa, zagospodarowania odpadów hutniczych, komputerowego wspomaganie technologii, wykorzystania termowizji w hutnictwie oraz kilkudziesięciu publikacji naukowych.



e-mail: mborecki@imz.pl

Prof. dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Bogusław Więcek jest kierownikiem Zakładu Termografii i Układów Elektronicznych w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Specjalizuje się w dziedzinie termografii komputerowej i modelowaniu zjawisk termicznych w elektronice. Jest członkiem komitetu naukowego największej na świecie konferencji poświęconej termowizji – Quantitive Infrared Thermography. W kraju Bogusław Więcek organizuje co 2 lata konferencję „Termografia i Termometria w Podczerwieni” – TTP.



e-mail: boguslaw.wiecek@p.lodz.pl

Dr hab. inż. Krzysztof PACHOLSKI

Krzysztof Pacholski zatrudniony jest na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Instytucie Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej. Główne obszary działalności naukowej to przetworniki i systemy pomiarowe wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, pomiary biomedyczne w zakresie oceny negatywnych skutków oddziaływania pola elektromagnetycznego na człowieka oraz mechatronika samochodowa.



e-mail: krzysztof.pacholski@p.lodz.pl

Dr inż. Robert OLBRYCHT

Robert Olbrycht jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Dotychczas opublikował 33. prace naukowe, jest współautorem dwóch patentów. Uczestniczył w realizacji 3. projektów badawczych finansowanych ze środków NCN oraz MNiSW. Zajmuje się problematyką korekcji parametrów metrologicznych kamer termowizyjnych i przetwarzania obrazów.



e-mail: robert.olbrycht@p.lodz.pl

Mgr inż. Robert STRĄKOWSKI

Ukończył Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej (2010). Obecnie doktorant w Zakładzie Układów Elektronicznych i Termografii PŁ. Jego zainteresowania naukowe obejmują przetwarzanie sygnałów i obrazów z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji oraz budowa systemów elektronicznych do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym.



e-mail: strakowski.robert@gmail.com

Streszczenie

Przedstawiono możliwości wykorzystania techniki termowizyjnej w hutnictwie żelaza i stali jako bezinwazyjną metodę pomiarową służącą do badania rozkładu pola temperaturowego na zewnętrznej powierzchni monitorowanego obiektu. Zaprezentowano wybrane przykłady wykorzystania kamery termowizyjnej w aplikacjach hutniczych jako narzędzia umożliwiającego kontrolę stanu termalnego urządzeń oraz ostrzegania przed awariami jak również badanie procesów technologicznych. Podkreślono nieinwazyjny charakter badań.

Słowa kluczowe: termowizja, termografia, podczerwień, badania nieniszczące, hutnictwo.

Qualitative aspects of thermal vision applications in steelworks

Abstract

Thermovision has a wide range of applications in iron and steel industry, where on the basis of the obtained results, researches and analysis, it is possible to evaluate the thermal state of a device, to control the production cycle, to verify technological procedures and to support processes of physical and numerical simulation. With using an infrared camera and appropriate software dedicated for the analysis of thermal images, we have the possibility to detect spots with the lowest and highest temperature on the surface of the examined object and determining the real-time temperature distribution along a specified line, area or point. This method allows

creating a qualitative and quantitative analysis. Considering the fact, that in the iron and steel metallurgy many processes consisting of great heat removal are realized, thermovision plays an important role in control of the state of devices and technological processes. In many cases, infrared cameras or scanners are installed on the production lines in order to monitor the production cycle e.g. systems of slag detection during draining steel from a metallurgical furnace to a ladle or infrared scanners used during the plate rolling process, where maintaining the temperature in a given scope is obligatory. The presented problems do not cover all possibilities of thermovision technique in iron and steel metallurgy; they only show selected aspects and examples of its typical applications.

Keywords: thermovision, thermography, infrared, non-invasive research, steelworks.

1. Wprowadzenie

Do oceny procesów technologicznych oraz zjawisk zachodzących w poszczególnych etapach produkcji w tym również w hutnictwie żelaza i stali bardzo ważnym czynnikiem jest znajomość wartości temperatury, gdyż jest ona podstawowym parametrem niemal wszystkich procesów technologicznych. Ponadto warunki cieplne mają podstawowy wpływ na cechy użytkowe wielu wyrobów.

Klasycznie stosowane przyrządy pomiarowe np. pirometry, termoelementy, termometry stykowe dają jedynie punktowy pomiar temperatury który nie zawsze jest wystarczający zwłaszcza gdy występuje szybka wymiana ciepła.

W wielu przypadkach konieczne są informacje o rozkładzie temperatury wzdłuż określonej linii lub na całej powierzchni badanego obiektu co pokazano w sposób humorystyczny na rys. 1 [1].



Rys. 1. Pierwszy bezinwazyjny pomiar temperatury [1]

Fig. 1. First non-invasive temperature measurement [1]

Wykorzystując kamerę termowizyjną oraz odpowiednie oprogramowanie do analizy termogramów możemy uzyskać informacje o rozkładzie pola temperaturowego na całej powierzchni badanego obiektu, w wybranym obszarze, zadanym profilu liniowym lub punkcie pomiarowym.

Do głównych kierunków wykorzystania techniki termowizyjnej w hutnictwie żelaza i stali możemy zaliczyć [2-9]:

- określenie stanu technicznego urządzeń oraz ich diagnostyka (piece z ciekłym metalem, kadzie, surówkownice, piece grzewcze, baterie koksownicze, rurociągi i inne)
- badanie hutniczych procesów technologicznych (wielkopiecownictwo, stalownictwo, przeróbka plastyczna, obróbka cieplna)
- wspomaganie procesów symulacji fizycznej i numerycznej.

Jako typowe przykłady dotyczące wykorzystania termowizji do określenia stanu technicznego urządzeń oraz badania procesów technologicznych oraz diagnostyki przemysłowej w hutnictwie żelaza i stali można podać:

- ocena stanu wyłożenia ogniotrwałych agregatów hutniczych (np. piece, kadzie)
- ocena strat cieplnych z pieców grzewczych
- kontrola baterii koksowniczych
- ocena stanu zanieczyszczeń w magistralach przepływu gazu
- kontrola procesu wielkopiecowego (procesy spiekania, rozkład wsadu w gardzieli wielkiego pieca)
- kontrola procesów stalowniczych (detekcja żużla podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi „slag detection”, wlewnice, wlewki, procesy ciągłego odlewania stali)
- optymalizacja procesów obróbki pozapiecowej
- badanie procesów przeróbki plastycznej (procesy walcowania, procesy kucia, proces wytwarzania rur)
- optymalizacja procesów obróbki cieplnej
- kontrola produkcji walców
- śledzenie procesu nagrzewania i stygnięcia
- kontrola procesu schładzania profili na chłodni pokrocznej oraz określenie równomierności i intensywności schładzania na całej powierzchni
- kontrola procesów technologicznych oraz procedur badawczych
- kontrola elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń hutniczych
- i wiele innych aplikacji.

Poniżej przedstawiono kilka praktycznych przykładów dotyczących procesów technologicznych, procedur badawczych oraz wspomaganie symulacji numerycznej.

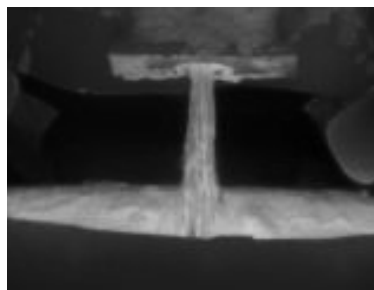
2. Przykłady zastosowań

Detekcja żużla podczas spustu stali z pieca hutniczego

W procesie metalurgicznym istotną sprawą jest, aby podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi odlewniczej nie dopuścić do przedostawania się żużla piecowego do kadzi odlewniczej ze względu na jego szkodliwy wpływ na własności stali. Wykorzy-

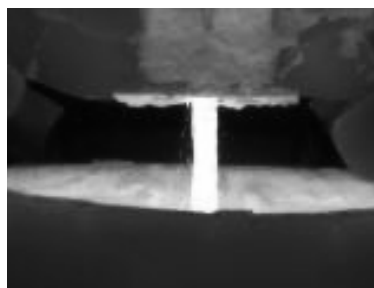
stuje się do tego celu różne metody głównie mechaniczne z których żadna nie znalazła uniwersalnego zastosowania. W ostatnich latach XX wieku została opracowana i wdrożona na rynek nowa metoda detekcji żużla oparta na termowizji. Obecność żużla podczas spustu stali z pieca do kadzi możemy zaobserwować w strumieniu ciekłego metalu poprzez pomiar energii wypromieniowanej ze stali i żużla w zakresie promieniowania podczerwonego.

Wynika to z faktu, że w procesie metalurgicznym żużel i stal mają w przybliżeniu jednakowe temperatury lecz różne charakterystyki promieniowania. Kamera termowizyjna dostrzega wtedy żużel jako znacznie cieplejszy. W praktyce na termogramie obserwujemy zmianę koloru wypływającej strugi w momencie pojawienia się żużla w otworze spustowym, co wynika z różnych współczynników emisyjności ciekłej stali i żużla. Stosowanie tej metody z odpowiednim systemem zamykania otworu spustowego, może skutecznie uniemożliwić przedostawanie się żużla piecowego do kadzi. Na rys. 2 przedstawiono termogram ilustrujący wypływający metal z otworu spustowego, a na rys. 3 pojawiający się żużel w otworze spustowym [5, 7].



Rys. 2. Termogram obrazujący czysty metal wypływający z otworu spustowego [7]

Fig. 2. Thermal image illustrating pure metal flowing out of the tapping hole [7]



Rys. 3. Termogram obrazujący pojawienie się żużla w otworze spustowym [7]

Fig. 3. Thermal image illustrating appearance of the slag in the tapping [7]

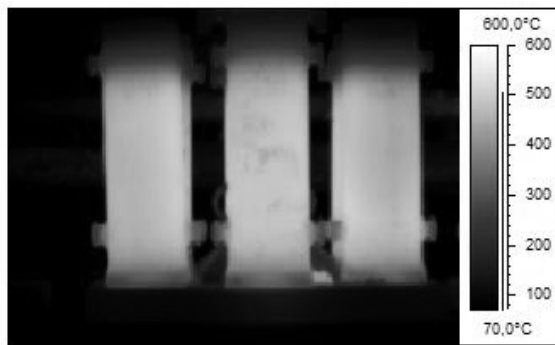
Badanie procesów zachodzących we wlewkach i wlewnicach

Istotnym problemem występującym podczas odlewania stali jest pęknięcie wlewnic i wlewków, które jest wywoływane naprężeniami termicznymi i mechanicznymi, występującymi podczas zbyt szybkich zmian temperatury w trakcie odlewania i krzepnięcia. Za pomocą kamery termowizyjnej można śledzić rozkłady termiczne na powierzchni wlewnic od chwili odlewania aż do schłodzenia i tzw. „striperowania” tj. rozbrojenia wlewnicy. Ma to duże znaczenie dla planowania dalszych czynności technologicznych, diagnostyki procesu krzepnięcia oraz umożliwia sprawdzenie prawidłowości przygotowania wlewnic przed zalaniem. Ponadto badania takie mogą się przyczynić do poprawy trwałości wlewnic oraz prac mających na celu dobór odpowiedniej konstrukcji wlewnicy i geometrii wlewka. Przykładowe aplikacje zestawu wlewnic przygotowanych do zalania oraz w trakcie procesu stygnięcia po zalaniu ciekłym metalem przedstawiono na rys. 4 i 5 [2, 6].



Rys. 4. Termogram obrazujący zestaw wlewnic przygotowanych do zalania płynną stalą [6]

Fig. 4. Thermal image presenting a set of ingots prepared to inundation with fluid steel [6]



Rys. 5. Termogram obrazujący zestaw wlewnic 30 minut po zalaniu płynną stalą [6]

Fig. 5. Thermal image presenting set of ingots 30 minutes after inundation with fluid steel [6]

Należy jednak wspomnieć, że obecnie zarówno w Polsce jak i w światowym hutnictwie większość stali odlewa się metodą ciągłego odlewania stali (ponad 85 %).

Badania termowizyjne mogą się również przyczynić do kontroli procesów ciągłego odlewania stali.

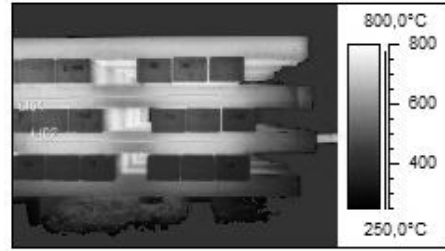
Analizie termowizyjnej można poddać wlewki odlewane w sposób ciągły począwszy od początku odlewania aż do ułożenia wlewków na tzw. „stosie”. Metodą tą można badać prawidłowość procesu chłodzenia wtórnego, gdzie nierównomierny rozkład na powierzchni wlewka ciągłego mógłby świadczyć o niewłaściwym sposobie chłodzenia wtórnego co w konsekwencji może doprowadzić do powstawania pęknięć.

Na rys. 6 przedstawiono wlewki ciągłe w trakcie procesu odlewania. Na rys. 7 oraz 9, przedstawiono wlewki ułożone na tzw. stosie. Natomiast na rys. 8 i 10 przedstawiono profile temperaturowe wzdłuż linii prowadzonej równolegle do osi wlewka [4].



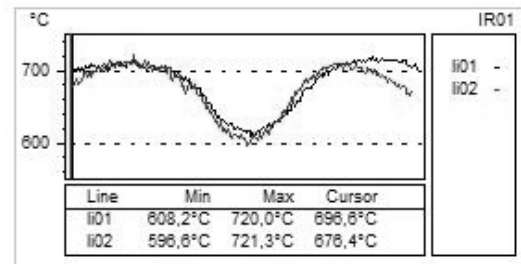
Rys. 6. Wlewek ciągły w trakcie procesu odlewania na urządzeniu COS

Fig. 6. Continuous casting on COS device



Rys. 7. Termogram obrazujący wlewki ułożone na stosie w sposób tzw. „luźny” [4]

Fig. 7. Thermal image presenting ingots “loosely” arranged on the stack [4]



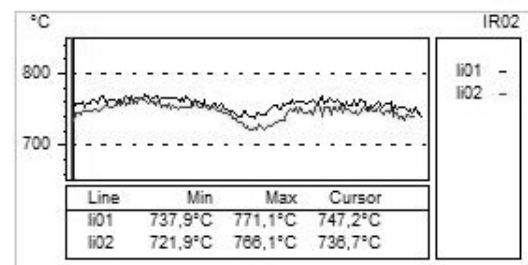
Rys. 8. Zestaw temperatur wzdłuż linii poprowadzonych równolegle do osi wlewków COS ułożonych „luźno na stosie” [4]

Fig. 8. Set of temperatures along the lines parallel to the axle of the COS ingots “loosely arranged on the stack” [4]



Rys. 9. Termogram obrazujący wlewki ułożone na stosie w sposób tzw. „ciasny” [4]

Fig. 9. Thermal image presenting ingots arranged on the stack “tightly” arranged on the stack [4]



Rys. 10. Zestaw temperatur wzdłuż linii poprowadzonych równolegle do osi wlewków COS ułożonych „ciasno na stosie” [4]

Fig. 10. Set of temperatures along the lines parallel to the axle of the COS ingots “tightly arranged on the stack” [4]

W procesach ciągłego odlewania stali badania termowizyjne można wykorzystywać zarówno do ustalania sposobu właściwego chłodzenia wtórnego poprzez dokonanie pomiaru temperatury powierzchni wlewków po wyjściu z komory chłodzenia wtórnego jak również opracowywania procedur technologicznych dotyczących odlanych wlewków co pokazano na rys. 7 – 10. Przy pomocy kamery termowizyjnej stwierdzono, że składowanie gorących wlewków ma istotny wpływ na sposób ich stygnięcia, co z kolei wpływa na ich jakość. Nierównomierne stygnięcie prowadzi do

powstawania naprężeń cieplno – mechanicznych, co w konsekwencji może doprowadzić do powstawania wad w postaci pęknięć. Dlatego istotną sprawą jest takie ułożenie wlewków aby odprowadzenie ciepła było w miarę możliwości równomierne [4].

Wspomaganie procesów symulacji procesów technologicznych

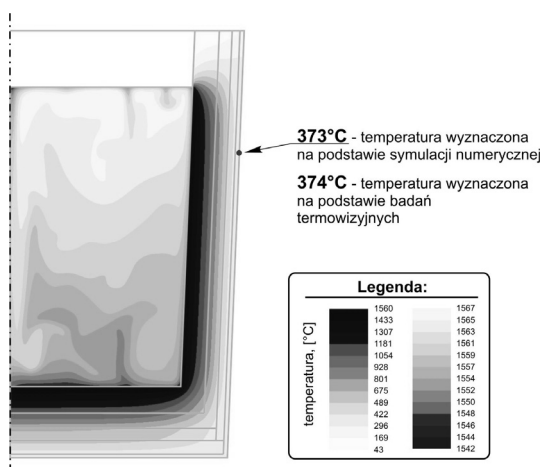
Technika termowizyjna w hutnictwie żelaza i stali oprócz typowych zastosowań do kontroli procesów technologicznych oraz oceny stanu technicznego urządzeń, może być wykorzystywana jako narzędzie pomocnicze w procesach symulacji zarówno fizycznej jak i numerycznej.

W przypadku symulacji fizycznej dokonuje się monitorowania procesów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych celem porównania wyników z badaniami prowadzonymi w skali przemysłowej.

Natomiast przypadku symulacji numerycznej pomiary termowizyjne są źródłem danych dla określenia warunków początkowych i brzegowych dla modeli matematycznych, a następnie ich weryfikacji poprzez porównanie wyników obliczeń i pomiarów na obiektach rzeczywistych.

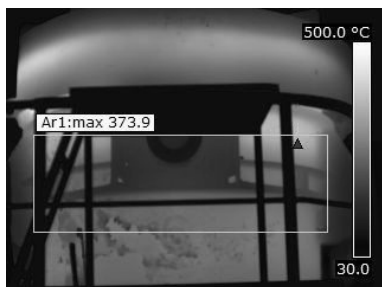
Badania takie przyczyniają się do poprawy parametrów technologicznych, zwiększenia wydajności urządzeń, zapobiegania awarii jak również do wzbogacenia informacji o przebiegu procesu. Ponadto wyniki takich badań są pomocne w powiązaniu z innymi metodami badawczymi.

Na rys. 11 i 12 przedstawiono przykład zastosowania badań termowizyjnych do weryfikacji wyników symulacji numerycznej. Przeprowadzone badania posłużyły do porównania temperatury pancierza kadzi lejniczej wyznaczonej na podstawie badań modelowych z pomiarami uzyskanymi za pomocą kamery termowizyjnej [8].



Rys. 11. Rozkład temperatury pancierza kadzi lejniczej wyznaczony na podstawie badań modelowych [8]

Fig. 11. The temperature distribution on the ladle casing determined by model research [8]



Rys. 12. Termogram obrazujący rozkład temperatury na powierzchni kadzi lejniczej usytuowanej na wieży urządzenia COS [8]

Fig. 12. The temperature distribution on the ladle casing determined by model research [8]

Na termogramie jest wyznaczona maksymalna temperatura pancierza kadzi w zadanym obszarze wynosząca około 374 °C, natomiast na podstawie symulacji numerycznej w porównywalnym punkcie temperatura pancierza kadzi wynosi 373 °C.

3. Podsumowanie

Technika termowizyjna znalazła szerokie zastosowanie w aplikacjach techniczno – przemysłowych, a zwłaszcza w tych przypadkach gdzie występowanie niesprawności urządzenia lub zakłócenie procesu technologicznego objawia się zmianą rozkładu temperatury. Ponadto zdalny i bezkontaktowy pomiar temperatury umożliwia kontrolę w ciągłych procesach produkcyjnych oraz może być wykorzystywany do wielu zagadnień specjalistycznych w tym również w hutnictwie żelaza i stali.

Informacje o rozkładzie pola temperaturowego możemy otrzymać w sposób natychmiastowy, a uzyskanie takich informacji innymi metodami jest praktycznie w większości przypadków bardzo trudne lub niemożliwe.

Na podstawie uzyskanych wyników badań termowizyjnych można dokonać oceny stanu urządzeń, kontroli cyklu produkcyjnego oraz weryfikować procedury technologiczne [2-4, 6-8].

W niektórych przypadkach uważa się za celowe instalowanie na liniach produkcyjnych specjalistycznych stacjonarnych kamer termowizyjnych lub skanerów na podczerwień do kontroli cyklu produkcyjnego. Jako przykłady można podać detekcje żużla podczas spustu stali z pieca hutniczego do kadzi, lub kontrolę procesu walcowania blach oraz nadzorowania systemu chłodzenia gdzie możemy wykorzystywać skanery podczerwieni [5, 9].

Przedstawione zagadnienia nie wyczerpują wszystkich możliwości zastosowań techniki termowizyjnej w hutnictwie żelaza i stali, sygnalizują jedynie wybrane aspekty oraz przedstawiają przykłady typowych zastosowań.

Ponadto należy wspomnieć, że mimo wielu zastosowań termowizji we wszystkich dziedzinach nauki i techniki należy spodziewać się ciągłego rozwoju wykorzystania tej techniki w tym również w hutnictwie żelaza i stali.

4. Literatura

- [1] Zemansky M.W.: Temperatury bardzo niskie i bardzo wysokie, PWN, Warszawa, 1968.
- [2] Wittchen W.: Zastosowanie badań termowizyjnych we współczesnej technice pomiarowej, Sprawozdanie IMŻ nr SO-221, 1998 (niepublikowane).
- [3] Green L.: Condition monitoring – its impact on plant performance AT British steel, Scuthorpe Works, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 17, No 5, 1990.
- [4] Wittchen W., Mazur A., Grabelus J., Stecko J., Borecki M.: Termowizja jako narzędzie do monitorowania procesów produkcyjnych w hutnictwie, IV konferencja Krajowa Termografia I Termometria w Podczerwieni, Łódź, listopad, 2000.
- [5] Zachorski F., Specht V.: Slag detection by means of infrared technology, MPT, International, Nr 1, 2000.
- [6] Kobic J., Pogorzalek J., Pawlas P., Wittchen W. i inni: Technologia wytwarzania stali i kucia osi bezpośrednio z wlewków – Dobór geometrii wlewka przeznaczonego do bezpośredniego kucia na osie i odpowiedniej konstrukcji wlewnicy drogą symulacji komputerowej oraz badań termowizyjnych, Sprawozdanie IMŻ nr PC-00080/10/BG/BS, 2002 (niepublikowane).
- [7] Wittchen W.: Wykorzystanie techniki termowizyjnej w hutnictwie żelaza i stali, Prace IMŻ, nr 1, 2010.
- [8] Wittchen W., Mazur A.: Metoda termowizji jako narzędzie pomocnicze w procesach symulacji numerycznej, Prace IMŻ, nr 1, 2012.
- [9] Rittenberg E.: Infrared line Scanning Used to Monitor and Control Cooling System, Industrial Heating, nr 1, 1966.