



Zastosowanie techniki termowizyjnej w procesach walcowania

Application of thermovision technique in rolling processes

(1) Konrad Laber*¹  (2) Henryk Dyja²  (3) Anna Kawalek¹  (4) Teresa Bajor¹ 

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

² Instytut Obróbki Plastycznej, ul. Jana Pawła II 14, 61-139 Poznań, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 20.09.2018

Recenzja: 31.10.2018

Akceptacja: 29.03.2019

Wkład autorów

- (1) Analiza literaturowa, autor koncepcji, założeń oraz metod badawczych, przeprowadzenie pomiarów termowizyjnych, obróbka i analiza wyników badań, redakcja tekstu
- (2) Nadzór merytoryczny, autor koncepcji badań termowizyjnych podczas procesu walcowania blach
- (3) Obróbka wyników badań pomiarów termowizyjnych podczas procesu walcowania blach
- (4) Analiza porównawcza wyników pomiarów termowizyjnych z danymi przemysłowymi oraz wynikami obliczeń numerycznych

ORCID iD

- (1) <https://orcid.org/0000-0003-2287-3665>
- (2) <https://orcid.org/0000-0002-3248-9643>
- (3) <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>
- (4) <https://orcid.org/0000-0003-0895-8523>

Article info

Received: 20.09.2018

Reviewed: 31.10.2018

Accepted: 29.03.2019

Authors' contribution

- (1) Literature analysis, author of concept, assumptions and research methods, implementation of thermovision measurements, processing and analysis of test results, text editing
- (2) Substantive supervision, author of the concept of thermovision testing during the sheet rolling process

Streszczenie

Temperatura odkształcanego materiału jest jednym z najważniejszych parametrów w wielu procesach technologicznych, w tym także w procesach walcowania. Dokładna znajomość i możliwość sterowania rozkładem temperatury w materiale podczas poszczególnych etapów procesu walcowania pozwala na prowadzenie procesu, w warunkach zapewniających uzyskanie gotowego wyrobu o żądanej budowie mikrostrukturalnej i własnościach mechanicznych. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów temperatury odkształcanego materiału podczas procesów walcowania w warunkach przemysłowych oraz laboratoryjnych. Badania w warunkach przemysłowych prowadzono podczas procesu walcowania blach stalowych. Badania w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono dla procesu walcowania trudno odkształcalnego stopu aluminium w trójwalcowej walcarni skośnej. Otrzymane wartości temperatury porównano z wartościami zarejestrowanymi przez systemy pomiarowe zainstalowane w liniach technologicznych, a także z wynikami obliczeń numerycznych. Ponadto w artykule przedstawiono wyniki badań temperatury walców żeliwnych oraz walców z pierścieniami wykonanymi z węglików spiekanych, podczas procesu wielożyłowego walcowania prętów żebrowanych. Do badań temperatury zastosowano kamerę termowizyjną ThermaCAM SC640 firmy FLIR Systems, wyposażoną w niechłodzony detektor. Na podstawie przedstawionych w pracy wyników badań stwierdzono, że w przypadkach, gdy nie jest możliwy pomiar temperatury metodą kontaktową, przy prawidłowo określonych parametrach (głównie emisyjności badanego materiału) można uzyskać wysoką dokładność pomiarów temperatury z zastosowaniem techniki termowizyjnej. Przeprowadzone w pracy badania wykazały zalety techniki termowizyjnej, która pozwala na określenie rozkładu temperatury na powierzchni badanego materiału w przeciwieństwie do pomiaru punktowego, z zastosowaniem pirometru.

Słowa kluczowe: termowizja, pomiary temperatury, walcowanie

Abstract

The temperature of deformed material is one of the most important parameters in many technological parameters, including rolling processes. The detailed knowledge and control of the temperature distribution in the material during individual rolling process stages enables the conduction of the process under conditions that ensure finished product of the desired microstructure and mechanical properties to be obtained. The study presents the results of the temperature measurements of deformed metal during rolling processes in industrial and laboratory conditions, respectively. Industrial tests were conducted during the process of rolling steel plates. Laboratory tests were carried out for the process of rolling a hard deformable aluminum alloy on a three-high skew rolling mill. The obtained temperature values were compared with values recorded by measuring systems installed in technological lines, as well as with the results of numerical computations. Moreover, the paper presents the

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber.konrad@wip.pcz.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber.konrad@wip.pcz.pl

- (3) *Treatment of the results of thermovision measurements during the rolling process*
- (4) *Comparative analysis of the results of thermovision measurements with industrial data and the results of numerical calculations*

ORCID iDs

(1) <https://orcid.org/0000-0003-2287-3665>

(2) <https://orcid.org/0000-0002-3248-9643>

(3) <https://orcid.org/0000-0003-0274-0582>

(4) <https://orcid.org/0000-0003-0895-8523>

results of temperature tests of cast iron rolls and rolls with rings made of sintered carbides, during the ribbed bars multi-strand rolling process. ThermaCAM SC640 Thermovision Thermometer from FLIR Systems, equipped with an uncooled detector, was used to test the temperature. On the basis of the results presented in this study it has been established that in situations, where it is not possible to take measurements by the contact method, with correctly defined parameters (primarily, the emissivity of the material to be examined), a high accuracy of temperature measurements can be achieved using the thermovision technique. The investigation carried out within the study has demonstrated the advantages of the thermovision technique that enables the determination of the distribution of temperature on the examined material surface, by contrast to the spot measurement using a pyrometer.

Keywords: *thermovision, temperature measurements, rolling*

1. WSTĘP

Na rozkład temperatury pasma w procesie walcowania wpływa wiele czynników, między innymi wielkość zadawanych odkształceń, warunki wymiany ciepła oraz sposób jego chłodzenia w różnych urządzeniach technologicznych. Dokładne określenie temperatury podczas kolejnych etapów procesu walcowania jest zagadnieniem skomplikowanym. Jest to spowodowane złożonymi warunkami wymiany ciepła i wartościami pojedynczych odkształceń [1]. Najważniejszą rolę w badaniach rozkładu temperatury przy zastosowaniu techniki termowizyjnej odgrywa emisyjność badanego materiału, która zmienia się w trakcie procesu technologicznego. Kolejnymi parametrami, które należy określić są: odległość kamery od badanego obiektu, temperatura odbita oraz wilgotność względna. Znajomość wymienionych parametrów pozwala na poprawne określenie rozkładu temperatury w przerabianym plastycznie materiale. Obszerny opis przyrządów oraz metod wykorzystywanych podczas pomiarów termowizyjnych można znaleźć między innymi w pracach [2, 3].

1.1. Podstawy pomiarów temperatury z wykorzystaniem kamer termowizyjnych

Podczas pomiarów z wykorzystaniem techniki termowizyjnej do kamery dociera nie tylko promieniowanie pochodzące z badanego obiektu. Kamera zbiera również promieniowanie z otoczenia, odbite od powierzchni obiektu. Wymienione składniki promieniowania są w pewnym stopniu tłumione przez atmosferę. Doadtkowo

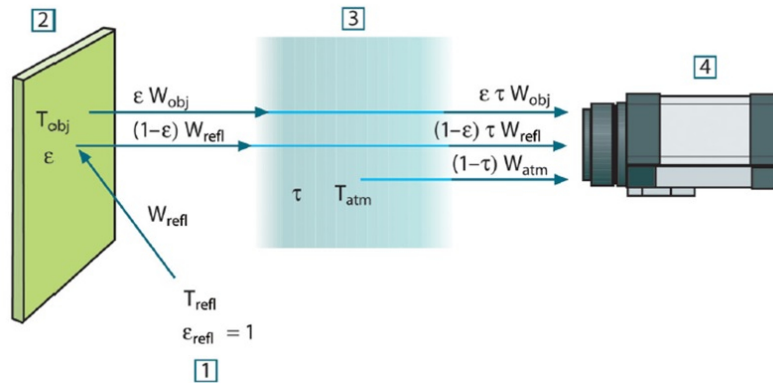
1. INTRODUCTION

The band temperature distribution in the rolling process is influenced by many factors, including the magnitude of preset deformations, heat exchange conditions and the method of band cooling in various technological devices. The accurate determination of temperature at successive rolling process stages is a complex problem. This is due to the complex heat exchange conditions and the value of single deformations [1]. The most important role in the examination of temperature distribution using the thermovision technique is played by the emissivity of the examined material, which varies during the course of the technological process. The next parameters that need to be determined are: the distance of the camera from the examined object, reflected temperature and relative humidity. The knowledge of the above-mentioned parameters enables the correct determination of the distribution of temperature in the plastically worked material. An extensive description of instruments and methods used in thermovision measurements can be found, e.g., in references [2, 3].

1.1. Fundamentals of temperature measurements using thermovision cameras

During measurements using the thermovision camera, it is not only radiation originating from the examined object that reaches the camera. The camera collects also radiation from the environment, which is reflected from the object's surface. The above-mentioned radiation components are, to some extent, attenuated by the

należy uwzględnić promieniowanie z atmosfery [4]. Ogólny schemat pomiarów termowizyjnych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat pomiarów termowizyjnych [4]: 1 – otoczenie, 2 – obiekt, 3 – atmosfera, 4 – kamera

Fig. 1. Scheme of thermovision measurements [3]: 1 – surroundings, 2 – object, 3 – atmosphere, 4 – camera

Moc promieniowania W z ciała czarnego, które posiada temperaturę T_{source} , znajdującego się w niewielkiej odległości, powoduje wygenerowanie w kamerze sygnału U_{source} proporcjonalnego do mocy (w przypadku kamery o charakterystyce liniowej). Można wówczas zapisać [4]:

$$\begin{aligned} U_{source} &= CW(T_{source}) \\ \text{lub} & \\ U_{source} &= CW_{source} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: C – stała.

W przypadku, gdy źródło byłoby ciałem szarym o emitalcji ε , odbierane promieniowanie byłoby równe εW_{source} .

Poniżej wymieniono trzy składniki mocy promieniowania [4]:

Emisja z obiektu = $\varepsilon\tau W_{obj}$, gdzie: ε – emitalcja obiektu, τ – transmitancja atmosfery, T_{obj} – temperatura obiektu.

Emisja odbita ze źródeł w otoczeniu = $(1-\varepsilon)\tau W_{refl}$, gdzie: $(1-\varepsilon)$ jest odbijalnością obiektu, T_{refl} – temperatura źródeł w otoczeniu.

Emisja z atmosfery = $(1-\tau)\tau W_{atm}$, gdzie $(1-\tau)$ jest emitalcją atmosfery, T_{atm} – temperatura atmosfery.

Całkowita odbierana moc promieniowania będzie wynosiła [4]:

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{refl} + (1-\tau)W_{atm} \quad (2)$$

atmosphere. In addition, radiation from the atmosphere should be taken into account [4]. A general schematic diagram of thermovision measurements is shown in Fig. 1.

The radiation power W of a black body at a temperature of T_{source} , located at a small distance, generates a signal U_{source} in the camera, which is proportional to the power (for a camera with a linear characteristic). Then, the following can be written [4]:

$$\begin{aligned} U_{source} &= CW(T_{source}) \\ \text{or} & \\ U_{source} &= CW_{source} \end{aligned} \quad (1)$$

where: C – constant.

If the source were a grey body of an emittance ε , the received radiation would be equal to εW_{source} .

The three components of the radiation power are listed below [4]:

Emission from object = $\varepsilon\tau W_{obj}$, where: ε – object emittance, τ – atmosphere transmittance, T_{obj} – object temperature.

Emission reflected from surrounding sources = $(1-\varepsilon)\tau W_{refl}$, where: $(1-\varepsilon)$ is the reflectivity of the object, T_{refl} – the temperature of surrounding sources.

Emission from the atmosphere = $(1-\tau)\tau W_{atm}$, where $(1-\tau)$ is the emittance of the atmosphere, T_{atm} – the temperature of the atmosphere.

The total radiation power received will be equal to [4]:

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1-\varepsilon)\tau W_{refl} + (1-\tau)W_{atm} \quad (2)$$

Mnożąc każdy człon przez stałą C (równanie (1)) i zastępując iloczyny CW odpowiednimi wartościami U , otrzymuje się [4]:

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (3)$$

Rozwiązując powyższe równanie ze względu na U_{obj} , otrzymuje się [4]:

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} U_{atm} \quad (4)$$

gdzie:

U_{obj} – obliczone napięcie wyjściowe z kamery dla ciała czarnego o temperaturze T_{obj} ; jest to napięcie, które można bezpośrednio przekształcić w rzeczywistą temperaturę obiektu;

U_{tot} – rzeczywiste zmierzone napięcie wyjściowe z kamery;

U_{refl} – teoretyczne napięcie wyjściowe z kamery dla ciała czarnego o temperaturze T_{refl} , zgodnie z kalibracją;

U_{atm} – teoretyczne napięcie wyjściowe z kamery dla ciała czarnego o temperaturze T_{atm} , zgodnie z kalibracją.

Równanie (4) jest ogólnym wzorem pomiarowym, wykorzystywanym we wszystkich urządzeniach termograficznych firmy FLIR Systems [4].

2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem przeprowadzonych w ramach pracy badań była analiza rozkładu temperatury w procesie walcowania blach ze stali: 16MO3, S235JR+N, S355J2+N oraz S355J2W+N w warunkach przemysłowych. Zakres pracy obejmował również badania rozkładu temperatury oraz efektu cieplnego, podczas walcowania trudno odkształcalnego stopu aluminium serii 7XXX, w warunkach laboratoryjnych. W ramach pracy przeprowadzono ponadto analizę rozkładu temperatury walców żeliwnych oraz walców z pierścieniami z węglików spiekanych, podczas procesu wielożyłowego walcowania prętów żebrowanych.

Do badań temperatury zastosowano kamerę termowizyjną ThermaCAM SC640 firmy FLIR Systems, wyposażoną w niechłodzony detektor. Do obróbki danych wykorzystano oprogramowanie ThermaCAM Researcher Professional.

Multiplying each element by a constant C (equation (1)) and replacing the product of CW with the corresponding U values, is obtained [4]:

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (3)$$

Solving the equation (3) for the sake of U_{obj} , is obtained [4]:

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} U_{atm} \quad (4)$$

where:

U_{obj} – calculated camera output voltage for a black body at a temperature of T_{obj} ; this is a voltage that can be converted directly into the actual object temperature;

U_{tot} – actual measured camera output voltage;

U_{refl} – theoretical camera output voltage for a black body at a temperature of T_{refl} , according to the calibration;

U_{atm} – theoretical camera output voltage for a black body at a temperature of T_{atm} , according to the calibration.

Equation (4) is a general measurement formula that is used in all thermographic devices by FLIR Systems [4].

2. THE AIM AND SCOPE OF RESEARCH

The aim of the investigation undertaken within the study was to analyze the distribution of temperature in the process of rolling plates of steels 16MO3, S235JR+N, S355J2+N and S355J2W+N under industrial conditions. The scope of the study encompassed also the examination of the temperature distribution and the thermal effect during rolling hard deformable aluminum alloy of series 7XXX in laboratory conditions. Within the framework of the study, the analysis of the distribution of the temperature of cast-iron rolls and sintered-carbide ring rolls during the process of multi-strand ribbed bar rolling was also made.

ThermaCAM SC640 Thermovision Thermometer from FLIR Systems, equipped with an uncooled detector, was used to test the temperature. ThermaCAM Researcher Professional software was used for data processing.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

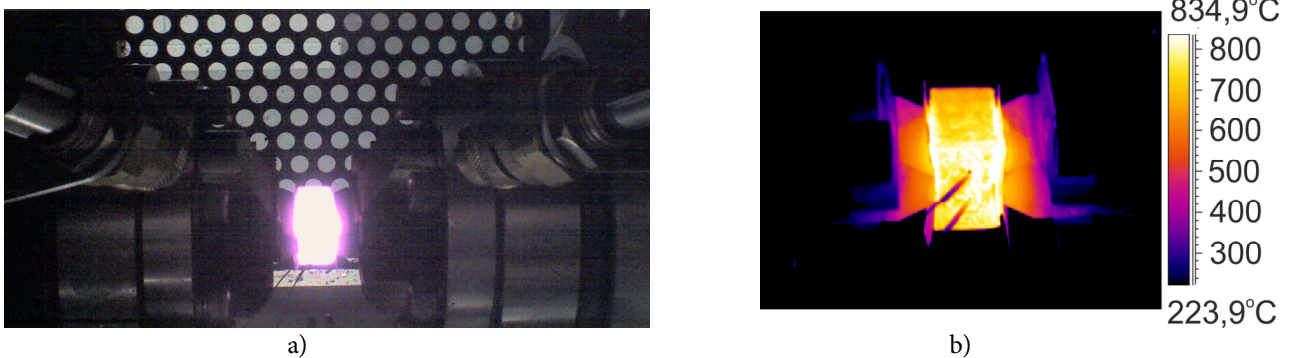
Badania rozkładu temperatury blach w warunkach przemysłowych zostały poprzedzone wyznaczeniem emisyjności badanych gatunków stali. Do określenia emisyjności zastosowano metodę przedstawioną w pracy [3]. Polega ona na wykorzystaniu stykowego pomiaru temperatury badanego obiektu. Według tej metody należy ustalić taką wartość emisyjności w kamerze termowizyjnej, aby wartości temperatury wyznaczone za pomocą kamery były takie same jak wyznaczone metodą stykową. Wartość emisyjności jest wtedy równa emisyjności powierzchni badanego materiału. Sposób wyznaczania emisyjności przedstawiono na rys. 2. Do badań zastosowano symulator procesów metalurgicznych GLEEBLE 3800 oraz (ze względu na badany zakres temperatury) termoparę typu S (PtRh10-Pt). Pomiary emisyjności wykonywano w powietrzu.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w badanym zakresie temperatury (800°C–1300°C) emisyjność wszystkich badanych gatunków była podobna i mieściła się w zakresie 0,80–0,84.

3. ANALYSIS OF RESEARCH RESULTS

The examination of the plate temperature distribution in industrial conditions was preceded by the determination of the emissivity of the steel grades under investigation. For emissivity determination, the method described in work [3] was used. It involves the contact measurement of the examined object's temperature. When using this method, such an emissivity value should be set in the thermovision camera that temperature values measured by the camera be identical to those determined by the contact method. The emissivity value is then equal to the emissivity of the examined object's surface. The method of determining the emissivity is illustrated in Fig. 2. The system GLEEBLE 3800 was used for the tests and (due to the temperature range studied) the S-type thermocouple (PtRh10-Pt). Emissivity measurements were made in the air.

From the obtained results it was found that, in the examined temperature range, the emissivity of all investigated grades was similar, being contained in the range of 0.80–0.84.



Rys. 2. Metodyka wyznaczania emisyjności próbek ze stali z wykorzystaniem metody kontaktowej: a) próbka w komorze symulatora GLEEBLE 3800 – widok ogólny, b) przykładowy termogram – temperatura 800°C

Fig. 2. Methodology of determining the emissivity of steel samples using the contact method: a) sample in the chamber of the GLEEBLE 3800 simulator – general view, b) example thermogram – temperature 800°C

3.1. Analiza rozkładu temperatury w trakcie rzeczywistego procesu walcowania blach

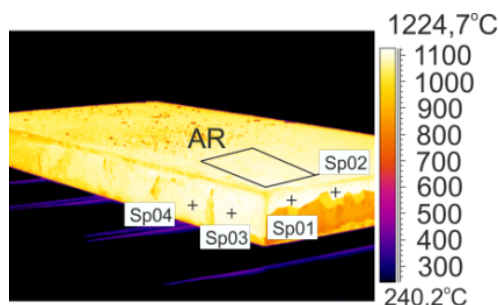
W tej części pracy przedstawiono przykładowe wyniki kompleksowej analizy rozkładu temperatury odkształcanych blach stalowych. Celem tej części badań było sprawdzenie rozkładu temperatury półwyrobów podczas poszczególnych etapów procesu technologicznego.

3.1. Analysis of the temperature distribution during the actual plate rolling process

This part of the study presents sample results of a comprehensive analysis of the temperature distribution of steel plates being deformed. The aim of this investigation part was to verify the distribution of semi-finished product temperature at individual stages of the technological process.

Badania przeprowadzono z powodu rozbieżności występujących w składzie mikro-struktury oraz własności mechanicznych wyrobu gotowego.

Na rys. 3–5 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów termowizyjnych półwyrobu znajdującego się w kilku wybranych miejscach ciągu walcowniczego. Przykładowy rozkład temperatury na powierzchni wsadu po zbiciu zgorzeliny przed procesem walcowania przedstawiono na rys. 3.



a)

Sp01	=	1186,5
Sp02	=	1215,7
Sp03	=	1202,8
Sp04	=	1186,0
AR _{max.}	=	1217,2
AR _{min.}	=	1057,1
AR _{śr.}	=	1184,5

b)

Rys. 3. Przykładowy rozkład temperatury wsadu do walcowania blach po zbiciu zgorzeliny:
a) termogram, b) wartości temperatury w analizowanych punktach

Fig. 3. Example the temperature distribution of feedstock for plate rolling after scaling:
a) thermogram, b) temperature values in the analyzed points

Analizując dane przedstawione na rys. 3 stwierdzono, że średnia temperatura górnej powierzchni pasma, po usunięciu z niej zgorzeliny, zmierzona z wykorzystaniem techniki termowizyjnej wynosiła około 1180°C. Z danych przedstawionych na rys. 3 wynika, że średnia temperatura na powierzchni bocznej analizowanego pasma była na poziomie 1200°C. Wartości parametrów obiektu podczas pomiarów wynosiły: emisyjność – 0,82; odległość 2,0 m; temperatura otoczenia i temperatura odbita 20,0°C; wilgotność względna 50%.

Z raportów technologicznych sporządzanych dla danego wydziału walcowni wynikało, że temperatura pasma odkształcanego w początkowych przepustach we wstępnej klatce walcowniczej wynosiła około 1270°C, co po uwzględnieniu, że temperatura w piecu grzewczym wynosiła około 1240°C, wydawało się wartością obciążoną dość dużym błędem. Stwierdzono, że wskazania piroometrów zainstalowanych w pobliżu wstępnej klatki walcowniczej analizowanej walcowni blach są zawyżone w stosunku do rzeczywistej wartości

The investigation was carried out because of discrepancies occurring in the micro-structure and mechanical properties of the finished product.

Fig. 3–5 show sample results of thermovision measurements taken on the semi-finished product at several selected points of the rolling train. A sample distribution of temperature on the surface of feedstock after the scale had been removed before the rolling process is illustrated in Fig. 3.

When analyzing the data in Fig. 3 it was found that the average temperature of the top band surface after scale removal, as measured using the thermovision technique, was about 1180°C. The data in Fig. 3 shows that the average temperature on the lateral surface of the examined band was at a level of 1200°C. The values of the object's parameters during measurements were as follows: emissivity, 0.82; distance, 2.0 m; ambient temperature and reflected temperature, 20.0°C; relative humidity, 50%.

The technological reports drawn up for the Rolling Mill Department under study showed that the temperature of the band deformed in initial rolling passes in the roughing stand was approx. 1270°C which, after taking into account the fact that the heating furnace temperature was about 1240°C, seemed a value burdened with a fairly large error. It was found that the readings of pyrometers installed in the vicinity of the roughing rolling stand of the examined Plate Rolling Mill were overstated relative to the actual temp-

temperatury walcowanego pasma. Może to być spowodowane np. nieprawidłową wartością emisyjności, która zmienia się dla zakresu temperatury charakterystycznej dla procesu walcowania blach. Wraz ze wzrostem temperatury, współczynnik ten zwiększa swoją wartość, co należy uwzględnić podczas wykonywanych pomiarów. Wartość emisyjności nie powinna być taka sama dla pirometrów zainstalowanych przy wstępnej klatce walcowniczej i przy klatce wykańczającej. W sytuacji, gdy np. wartości temperatury pasma odkształcanego w klatce wykańczającej zmierzone z wykorzystaniem techniki termowizyjnej są zbliżone do wartości uzyskanych za pomocą pirometru, można mówić o poprawnym doborze współczynnika emisyjności. Taka sama wartość tego współczynnika ustawiona w pirometrze zabudowanym w pobliżu klatki wstępnej, będzie powodem wskazywania zawyżonej wartości temperatury walcowanego metalu. Kolejnym czynnikiem wpływającym na błędne wskazania pirometrów jest tworzenie się tzw. „koszulki parowej” przy obydwu klatkach walcowniczych, na skutek obecności bardzo dużej ilości wody i pary wodnej, występującej podczas pracy zbijacza zgorzeli zainstalowanego przed wstępną klatką walcowniczą oraz przy chłodzeniu walców i splukiwaniu zgorzeli z powierzchni walcowanej blachy. Pewnym rozwiązaniem może być zastosowanie pirometrów dwubarwnych, których dokładność pomiaru pomimo występowania zjawiska tzw. „koszulki parowej” jest większa.

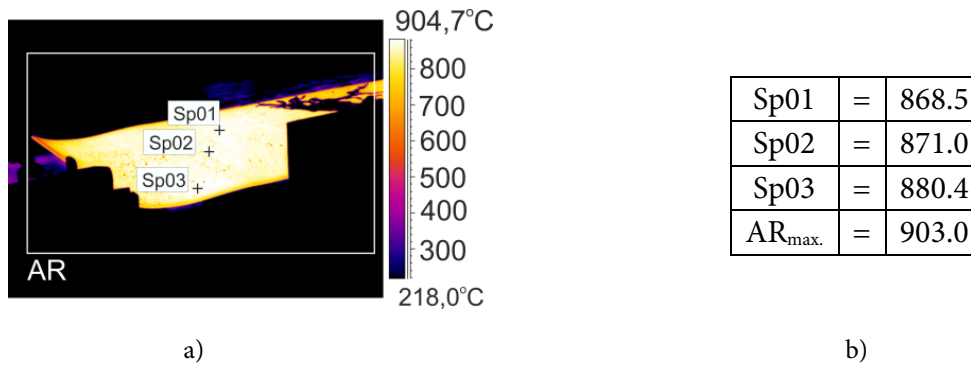
Na rys. 4 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury pasma przed przepustem nr 5 w klatce wykańczającej.

Przeprowadzone z wykorzystaniem techniki termowizyjnej pomiary wykazały, że średnia wartość temperatury zmierzonej na powierzchni walcowanego pasma przed przepustem nr 5 wynosiła około 870°C. Z kolei maksymalna temperatura zarejestrowana na powierzchni walcowanego pasma wynosiła nieco ponad 900°C.

erature value of the rolled band. This might be caused by, e.g., an incorrect emissivity value, which is variable for the range of the temperature characteristic of the plate rolling process. With the increase in temperature, this coefficient increases in value, which needs to be taken into account when taking measurements. The emissivity value should not be the same for pyrometers installed at the roughing stand and at the finishing stand. In a situation, where, e.g., the temperature values of band deformed in the finishing stand, as measured with the thermovision technique, are close to the values obtained using a pyrometer, we can say that the emissivity coefficient has been selected correctly. The identical value of this coefficient set in a pyrometer mounted near the roughing stand will be the cause of indicating an overstated temperature of the rolled metal. Another factor contributing to erroneous readings of pyrometers is the formation of the so-called “steam jacket” at both rolling stands due to a very large amount of water and water vapor occurring during the operation of the scale remover installed in front of the roughing stand and during cooling the rolls and flushing the scale off the rolled plate surface. A solution could be using pyrometers dichromatic pyrometers, whose measuring accuracy, in spite of the occurring “steam jacket” phenomenon, is higher.

Fig. 4 shows a sample distribution of band temperature before rolling pass no. 5 in the finishing stand.

The measurements carried out using the thermovision technique showed that the average value of temperature measured on the surface of the rolled band before pass no. 5 was about 870°C. In turn, the maximum temperature recorded on the rolled band surface was slightly above 900°C.



Rys. 4. Przykładowy rozkład temperatury pasma przed przepustem nr 5 w klatce wykańczającej:

a) termogram, b) wartości temperatury w określonych punktach

Fig. 4. Example temperature distribution of the band before rolling pass no. 5 in the finishing stand:

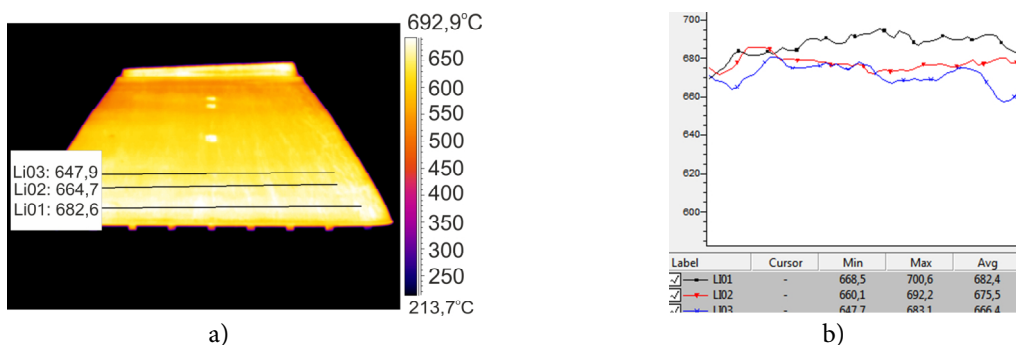
a) thermogram, b) temperature values at specific points

Według danych zamieszczonych w raportach inżynierskich temperatura pasma wynosiła wtedy 816°C. Rozbieżności w zmierzonych wartościach wynoszące 80°C (porównując wartości temperatury zmierzone pirometrem z maksymalnymi wartościami zmierzonymi kamerą termowizyjną) mogą być spowodowane zakłóceniami wywołanymi obecnością dużej ilości mieszaniny wody i pary wodnej na powierzchni walcowanego materiału, pochodzącej z systemu chłodzenia walców i usuwania zgorzeli. Rzeczywista wartość temperatury walcowanego pasma może być w takiej sytuacji znacznie wyższa niż zmierzona pirometrem, co przekłada się bezpośrednio na mikrostrukturę i własności wyrobu gotowego.

Na rys. 5 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury na powierzchni górnej pasma po procesie walcowania. Z uwagi na duży kąt ustawienia kamery względem analizowanego pasma analizę przeprowadzono tylko dla niewielkiego jego obszaru.

According to the data provided in the engineering reports, the band temperature was at that time 816°C. The discrepancies in the measured values, amounting to 80°C (by comparing the temperature values measured with a pyrometer with the maximum values measured using a thermovision camera) might be due to disturbances caused by a large quantity of water and steam mixture present on the rolled bar surface, originating from the roll cooling and scale removal system. The actual value of rolled band temperature may be in such a situation much higher than that measured with a pyrometer, which translates directly into the microstructure and properties of the finished product.

Fig. 5 shows a sample distribution of temperature on the top layer of band after the rolling process. Because of a large angle of camera setting relative to the examined band, the analysis was made only for a small band area.



Rys. 5. Przykładowy rozkład temperatury pasma po procesie walcowania:

a) termogram, b) rozkład temperatury wzdłuż linii pomiarowych (fragment)

Fig. 5. Example of the temperature distribution of the band after the rolling process:

a) thermogram, b) temperature distribution along measurement lines (section)

Analizując dane przedstawione na rys. 5, stwierdzono, że średnia temperatura górnej powierzchni pasma (średnia wartość wzdłuż linii pomiarowych) po walcowaniu, zmierzona z wykorzystaniem techniki termowizyjnej wynosiła w zależności od miejsca pomiaru od około 650 do 680°C. Rozkład temperatury na szerokości badanej blachy był stosunkowo równomierny. W końcowej części blachy zaobserwowano wąski obszar o obniżonej temperaturze (około 600°C) na całej jej szerokości.

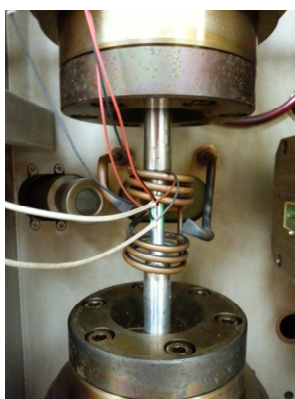
Na podstawie przeprowadzonych badań rozkładu temperatury walcowanych pasm z wykorzystaniem techniki termowizyjnej oraz po porównaniu otrzymanych wartości z danymi zarejestrowanymi przez systemy pomiarowe zainstalowane w analizowanym wydziale walcowni blach stwierdzono, że średnia temperatura wsadu przed procesem nagrzewania wynosiła (dla kolejnych kęsisk) od około 1200°C do 1260°C. Średnia temperatura górnej powierzchni wsadu, po usunięciu zgorzeliny, zmierzona z wykorzystaniem techniki termowizyjnej wynosiła (dla kolejnych kęsisk) od około 1180°C do 1200°C, natomiast średnia temperatura na powierzchni bocznej analizowanych wlewków mieściła się w granicach od 1200°C do 1220°C. Porównując wartości temperatury walcowanych pasm przy wykorzystaniu zainstalowanych w hali walcowniczej pirometrów z wynikami pomiarów termowizyjnych przed klatką wstępną stwierdzono, że w pewnych przypadkach punktowy pomiar temperatury wykonywany pirometrem może być obciążony błędem, spowodowanym dużą ilością mieszaniny wody i pary wodnej, tworzących tzw. „koszulkę parową”, która zakłóca prawidłowy pomiar rzeczywistej wartości temperatury walcowanej blachy. W pewnych przypadkach na powierzchni pasm walcowanych w klatce wykańczającej występowały obszary o obniżonej wartości temperatury, spowodowane między innymi chłodzeniem pasma od rolek samotoku oraz podobnie jak podczas walcowania w klatce wstępnej, dużą ilością mieszaniny wody oraz pary wodnej na powierzchni blachy. Punktowy odczyt temperatury w tych miejscach z wykorzystaniem pirometru może być zaniżony w stosunku do rzeczywistej wartości temperatury walcowanego pasma, która bezpośrednio wpływa na właściwości mechaniczne wyrobu gotowego. Podczas walcowania wyrobów płaskich miejscami najbardziej narażonymi na ochłodzenie są naroża oraz krawędzie boczne walcowanych blach.

When analyzing the data in Fig. 5 it was found that the average temperature of the top of band (the average value along the measurement lines) after rolling, as measured using the thermovision technique, ranged from about 650 to do 680°C, depending on the measurement location. The temperature distribution across the width of the examined plate was relatively uniform. In the end part of the plate, a narrow region of a lowered temperature (about 600°C) across its entire width was observed.

Based on the examination of rolled band temperature distribution using the thermovision technique and after comparing the obtained values with data recorded by the measuring systems installed in the examined Plate Rolling Mill Department it was found that the average temperature of the stock prior to the heating process was (for successive slabs) from around 1200°C to 1260°C. The average temperature of the top stock surface after scale removal, as measured using the thermovision technique, was (for successive slabs) from around 1180°C to 1200°C, while the average temperature on the lateral surface of the examined slabs ranged from 1200°C do 1220°C. By comparing rolled band temperature values obtained using pyrometers installed in the Rolling Hall with the results of thermovision measurements taken before the roughing stand it was found that, in some cases, a spot temperature measurement taken with a pyrometer might be burdened with an error caused by a large amount of water and steam mixture forming the so-called “steam jacket” which disturbs the correct measurement of the actual temperature of rolled plate. In some instances, regions of a lowered temperature value occurred on the surface of bands rolled in the finishing stand, which were caused, inter alia, by band cooling from the roller table rollers and, like during rolling in the roughing stand, by a large amount of water and water vapor mixture on the plate surface. The spot temperature reading taken in those locations with a pyrometer may be understated relative to the actual value of rolled band temperature, which directly influences the mechanical properties of the finished product. During rolling flat products, the locations prone most to cooling down are the corners and side edges of rolled plate.

3.2. Analiza rozkładu temperatury stopu aluminium serii 7XXX podczas procesu walcowania w warunkach laboratoryjnych

Badania temperatury trudno odkształcalnego stopu aluminium serii 7XXX podczas walcowania, podobnie jak w przypadku pomiarów temperatury blach, zostały poprzedzone wyznaczeniem emisyjności badanego stopu metodą odwrotną, z wykorzystaniem termopary typu K (NiCr-NiAl). Do pomiarów temperatury materiałów charakteryzujących się niską emisyjnością, do których zalicza się aluminium i jego stopy, wykorzystano 3 termopary, zgrzane z powierzchnią badanego materiału. Po nagraniu materiału do żądanej wartości temperatury, która sterowana i kontrolowana była za pomocą termopar, dokonywano korekty emisyjności w kamerze termowizyjnej tak, aby w mierzonych punktach wartości temperatur były zgodne. Sposób wyznaczania emisyjności przedstawiono na rys. 6. Do badań zastosowano plastometr skrętny STD 812. Pomiary emisyjności przeprowadzono w powietrzu. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w badanym zakresie temperatur (150°C–350°C) emisyjność badanego stopu aluminium mieściła się w zakresie 0,08–0,40 i zmniejszała się wraz ze wzrostem temperatury badanego stopu [5].



a)



b)

Rys. 6. Metodyka wyznaczania emisyjności stopu aluminium serii 7XXX z wykorzystaniem metody kontaktowej: a) próbka z termoparami w komorze plastometru, b) korekcja współczynnika emisyjności z wykorzystaniem kamery termowizyjnej

Fig. 6. Methodology for determining the emissivity of the 7XXX series aluminum alloy using the contact method: a) sample with thermocouples in the plastometer chamber, b) correction of the emissivity coefficient with the use of thermovision camera

Na rys. 7 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatury trudno odkształcalnego stopu aluminium serii 7XXX w trakcie procesu walcowania w trójwalcowej walcarni skośnej. Celem tego etapu badań była weryfikacja zarówno badań numerycznych z wykorzystaniem programu FORGE 3D, jak również fizycznego modelowania analizowanego procesu, których szczegółowe wyniki przedstawiono w pracy [5].

Stwierdzono, że po procesie walcowania wsadu o temperaturze początkowej 200°C, w wyniku intensywnego odkształcenia plastycznego (odkształcenie rzeczywiste około 4), po pierwszym przepuszczeniu temperatura pręta wzrosła do około 320°C, po drugim przepuszczeniu do około 350°C, natomiast po trzecim i czwartym do około 330°C. Podczas walcowania wsadu o temperaturze 250°C, temperatura odkształcanego stopu aluminium po każdym przepuszczeniu wzrastała do około 350°C. Dla badanego stopu aluminium serii 7XXX podczas walcowania prętów z wsadu o temperaturze 200°C efekt cieplny wywołany intensywnym odkształceniem plastycznym jest większy, niż przy walcowaniu prętów z wsadu o temperaturze 250°C.

Ponadto przeprowadzone badania termowizyjne ujawniły charakterystyczne dla analizowanego procesu walcowania obszary pręta o obniżonej temperaturze.

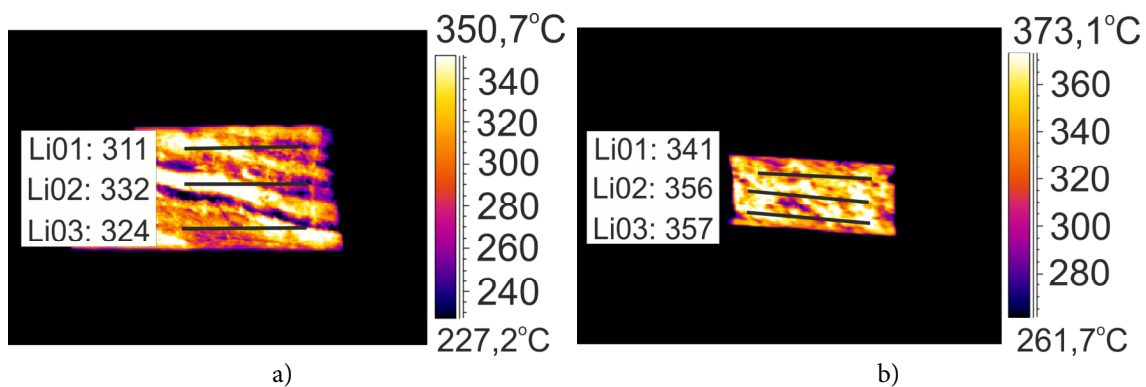
Na rys. 8 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury w pręcie, uzyskany w wyniku numerycznego modelowania analizowanego procesu walcowania skośnego.

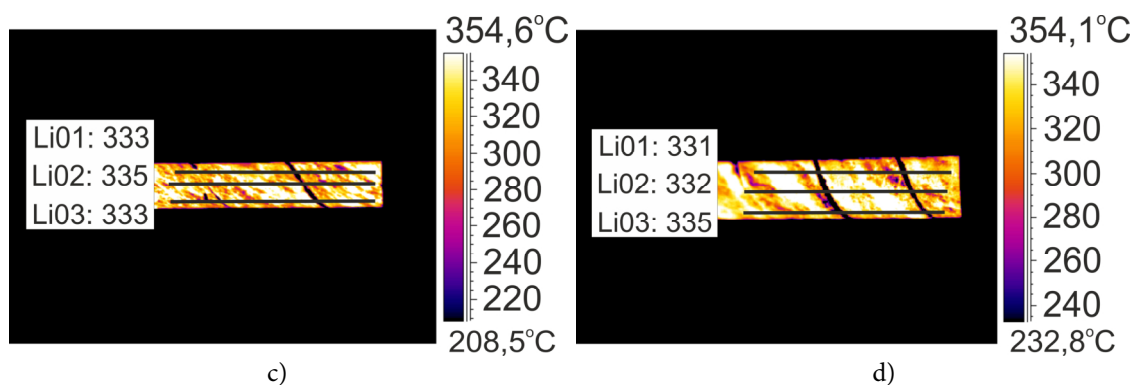
Fig. 7 presents exemplary results of temperature measurements of a hard-deformable 7XXX series aluminum alloy during the rolling process in a three-high skew rolling mill. The aim of this stage of the research was to verify numerical research using the FORGE 3D program and physical modeling of the analyzed process, detailed results of which are presented in paper [5].

It was found that after the process of rolling feedstock at an initial temperature of 200°C, due to an intensive plastic deformation (a true strain of about 4), after the first rolling pass, the bar temperature increased to approx. 320°C; after the second pass, to approx. 350°C; while after the third and fourth passes, to approx. 330°C. During rolling feedstock at a temperature of 250°C, the temperature of the deformed aluminum alloy after each pass increased to about 350°C. For the examined 7XXX series aluminum alloy, during rolling bars from feedstock at a temperature of 200°C, the thermal effect caused by intensive plastic deformation is greater than during rolling bars from feedstock at 250°C.

Moreover, the thermovision examinations revealed bar areas of a lowered temperature, being characteristic of the rolling process under examination.

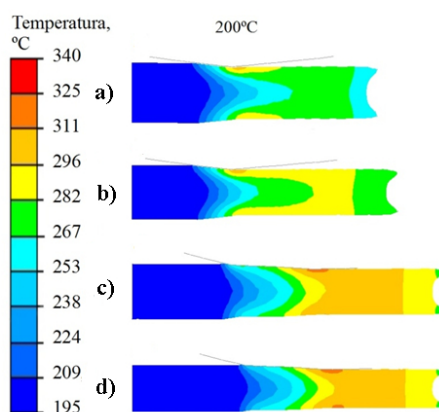
Fig. 8 presents an example of temperature distribution in a bar, obtained as a result of numerical modeling of the analyzed skew rolling process.





Rys. 7. Rozkłady temperatury pręta ze stopu aluminium serii 7XXX, po procesie walcowania skośnego z wsadu o temperaturze 200°C: a) przepust nr 1, b) przepust nr 2, c) przepust nr 3, d) przepust nr 4

Fig. 7. Temperature distributions of the 7XXX series aluminum alloy rod, after the process of skew rolling from the feedstock at a temperature 200°C: a) pass no. 1, b) pass no. 2, c) pass no. 3, d) pass no. 4



Rys. 8. Rozkłady temperatury na przekroju wzdłużnym aluminiowych prętów serii 7XXX, walcowanych ze wsadu o temperaturze 200°C [5]: a) przepust nr 1, b) przepust nr 2, przepust nr 3, d) przepust nr 4

Fig. 8. Temperature distributions on the longitudinal section of the 7XXX series aluminum alloy rod, after the process of skew rolling from the feedstock at a temperature 200°C [5]: a) pass no. 1, b) pass no. 2, c) pass no. 3, d) pass no. 4

Analiza porównawcza pomiarów termowizyjnych temperatury walcowanego stopu aluminium z wynikami obliczonymi numerycznie wykazała dobrą zgodność otrzymanych wartości. Różnice pomiędzy zmierzonymi a obliczonymi wartościami temperatury w większości przypadków nie przekraczały 11%. Ponadto otrzymano dobrą zbieżność pomiarów mocy walcowania (wyznaczonej numerycznie oraz zmierzonej podczas walcowania w warunkach laboratoryjnych), która zależy od rzeczywistej temperatury odkształcanego materiału. Świadczy to zarówno o poprawnym określeniu warunków początkowych i brzegowych, przyjętych do modelowania numerycznego, jak również o prawidłowym wyznaczeniu emisyjności badanego materiału, wykorzystanej podczas pomiarów termowizyjnych.

The comparative analysis of the results of the thermovision measurements of rolled aluminum temperature with the results computed numerically showed a good agreement between these results. Differences between the measured and computed temperature values, in the majority of cases, did not exceed 11%. Moreover, a good concurrence of the measurements of rolling power (determined numerically and measured during rolling in laboratory conditions), which depends on the actual deformed metal temperature, was obtained. This shows that the initial and boundary conditions adopted for numerical modelling were defined correctly, and that the emissivity of the examined material, which was used in thermovision measurements, was determined correctly.

3.3. Analiza rozkładu temperatury powierzchni walców w warunkach przemysłowych

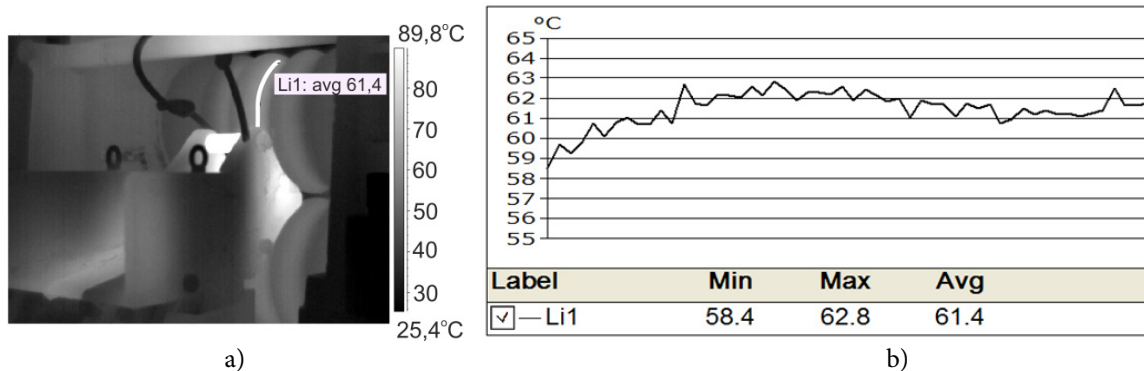
Na rys. 9–11 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatury powierzchni walców roboczych w walcowni ciągłej prętów. Badania te przeprowadzono dla walców żeliwnych, znajdujących się w grupie wstępnej oraz pośredniej walcowni ciągłej bruzdowej, a także dla walców z pierścieniami wykonanymi z węglików spiekanych, zainstalowanych w grupie wykańczającej ciągu walcowniczego, gdzie wytwarzane są gotowe pręty okrągłe żebrowane ze stali do zbrojenia betonu, w technologii wielożyłowej. Celem tej części badań było sprawdzenie rozkładu temperatury na powierzchni poszczególnych wykrojów naciętych w walcach roboczych, z uwagi na nierównomierne zużywanie się powierzchni wykrojów.

Pomiary temperatury prowadzono po wyłączeniu systemu chłodzącego. Otrzymane wartości temperatury zweryfikowano dodatkowo metodą kontaktową, z wykorzystaniem termopar. Przykładowy rozkład temperatury powierzchni walców żeliwnych, przedstawiono na rys. 9.

3.3. Analysis of the distribution of roll surface temperature in industrial conditions

Fig. 9–11 show sample results of the measurements of working roll surface temperature in the Continuous Bar Rolling Mill. These examinations were carried out for cast iron rolls in the roughing and intermediate groups of the Continuous Shape Mill, as well as for sintered carbide ring rolls installed in the finishing group of the rolling train, where finished round ribbed bars are manufactured of concrete reinforcement steel in multi-strand technology. The aim of this part of the study was to verify the distribution of temperature on the surface of individual grooves cut in the working rolls, in view of the non-uniform wear of the groove surface.

Temperature measurements were taken after switching the cooling system off. The obtained temperature values were additionally verified by a contact method using thermocouples. An example of cast iron roll surface temperature distribution is shown in Fig. 9.



Rys. 9. Rozkład temperatury powierzchni walców żeliwnych [6]: a) termogram, b) rozkład temperatury wzdłuż linii Li 1
Fig. 9. Distribution of the cast iron roll surface temperature [6]: a) thermogram, b) temperature distribution along the Li 1 line

Podczas prowadzonych pomiarów termowizyjnych średnia temperatura powierzchni walców żeliwnych zainstalowanych w walcowni ciągłej prętów wynosiła około 60°C. Wartości parametrów obiektu podczas pomiarów średniej temperatury walców żeliwnych wynosiły: emisyjność – 0,5 [7]; odległość 3,0 m; temperatura otoczenia i temperatura odbita 20,0°C; wilgotność względna 50%. Odległość od badanego obiektu została wpro-

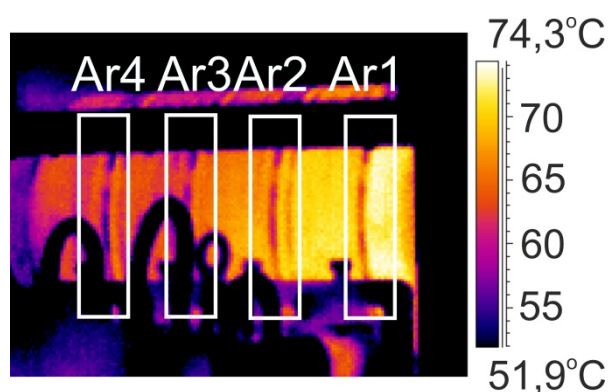
During conducted thermovision measurements, the average surface temperature of the cast iron rolls installed in the Continuous Bar Rolling Mill was around 60°C. The values of the object's parameters during the measurements of the average cast iron roll temperature were as follows: emissivity, 0.5 [7]; distance, 3.0 m; ambient temperature and reflected temperature, 20.0°C; relative humidity, 50%. The distance from the examined object was in-

wadzona do kamery termowizyjnej zgodnie z warunkami występującymi przy przeprowadzaniu pomiarów. Temperatura odbita oraz wilgotność względna zostały ustalone na podstawie danych zawartych w pracy [4].

Na rys. 10 i 11 pokazano przykładowe wyniki badań rozkładu temperatury na powierzchni pierścieni walcowniczych wykonanych z węglików spiekanych.

put into the thermovision camera as appropriate for the conditions prevailing when conducting the measurements. The reflected temperature and relative humidity were set based on the data provided in work [4].

Fig. 10 and 11 show sample results of the examination of temperature distribution on the surface of the sintered carbide roll rings.



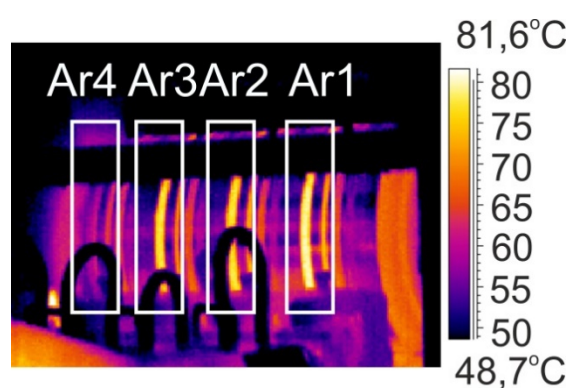
a)

Parametry obiektu Object parameters	Wartość Value	
Emisyjność / Emissivity	0,40	
Odległość / Distance	3,0 m	
Temperatura odbita Reflected temperature	20,0°C	
Temperatura powietrza Air temperature	30,0°C	
Wilgotność względna Relative humidity	50%	
Ar1: Max	74°C	
Ar2: Max	73°C	
Ar3: Max	69°C	
Ar4: Max	67°C	

b)

Rys. 10. Rozkład temperatury na powierzchni pierścieni walcowniczych z węglików spiekanych w przedostatniej klatce walcowniczej: a) termogram, b) tabela parametrów obiektu

Fig. 10. Temperature distribution on the surface of the sintered carbide roll rings in the one before last roll stand: a) thermogram, b) object parameters table



a)

Parametry obiektu Object parameters	Wartość Value
Emisyjność / Emissivity	0,40
Odległość / Distance	3,0 m
Temperatura odbita Reflected temperature	20,0°C
Temperatura powietrza Air temperature	30,0°C
Wilgotność względna Relative humidity	50%
Ar1: Max	81°C
Ar2: Max	79°C
Ar3: Max	79°C
Ar4: Max	65°C

b)

Rys. 11. Rozkład temperatury na powierzchni pierścieni walcowniczych z węglików spiekanych w ostatniej klatce walcowniczej: a) termogram, b) tabela parametrów obiektu

Fig. 11. Temperature distribution on the surface of the sintered carbide roll rings in the final roll stand: a) thermogram, b) object parameters table

Pomiary temperatur prowadzono w dwóch ostatnich kłatkach grupy wykańczającej, podczas procesu walcowania stalowych prętów żebrowanych, w technologii wielożyłowej. Wartość emisyjności dla pierścieni wykonanych z węglików spiekanych została dobrana zgodnie z danymi przedstawionymi w pracach [8–10] i wynosiła 0,4. Odległość od badanego obiektu oraz temperatura otoczenia zostały wprowadzona do kamery termowizyjnej zgodnie z warunkami w jakich przeprowadzono pomiary.

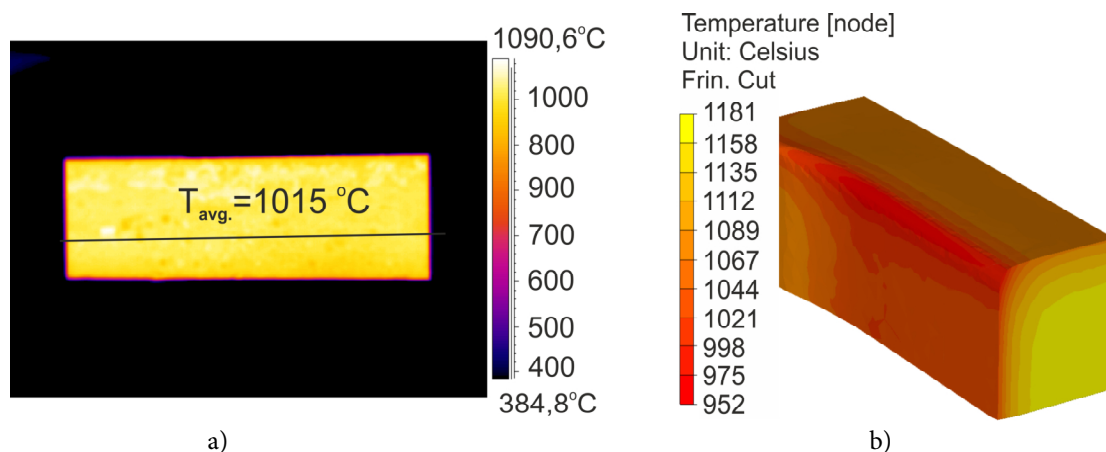
Podczas procesu walcowania stalowych prętów żebrowanych w przedostatniej klatce walcowniczej (rys. 10) temperatura powierzchni walców wynosiła od około 67°C do około 74°C. Z kolei w ostatniej klatce walcowniczej (rys. 11) temperatura ta wahała się w granicach od około 65°C do około 81°C. Zastosowanie techniki termowizyjnej pozwoliło na ujawnienie pewnej nierównomierności nagrzewania się poszczególnych wykrojów na walcach, co może powodować nierównomierne zużywanie się pierścieni wykonanych z węglików spiekanych.

W celu weryfikacji poprawności przeprowadzonych badań termowizyjnych wykonano modelowanie numeryczne procesu walcowania, z uwzględnieniem zmierzonej temperatury walców. Na rys. 12 przedstawiono przykładowe wyniki rozkładu temperatury pasma podczas procesu walcowania stali wysokowęglowej w walcowni ciągłej w warunkach przemysłowych oraz obliczone numerycznie.

Temperature measurements were taken in the last two stands of the finishing group during the process of rolling steel ribbed bars in multi-strand technology. The emissivity value for the sintered carbide rings was selected in accordance with the data provided in works [8–10], amounting to 0.4. The distance from the examined object and ambient temperature were input into the thermovision camera as appropriate for the conditions in which the measurements were to be taken.

During the process of rolling steel ribbed bars in the last but one rolling stand (Fig. 10), roll surface temperature ranged from around 67°C to around 74°C. In turn, in the last rolling stand (Fig. 11), the temperature oscillated from around 65°C to around 81°C. The employed thermovision technique revealed a certain non-uniformity in heating up individual grooves on the rolls, which might cause a non-uniform wear of the sintered carbide rings.

To verify the correctness of the performed thermovision examinations, numerical modelling of the rolling process was carried out, taking into account the measured roll temperature. Fig. 12 shows examples of the band temperature distribution results obtained from the process of rolling high-carbon steel in the Continuous Rolling Mill in industrial conditions, and computed numerically, respectively.



Rys. 12. Przykładowy rozkład temperatury powierzchni pasma po procesie walcowania w klatce walcowniczej nr 1:
a) termogram, b) wyniki obliczeń numerycznych

Fig. 12. Example distribution of the band surface temperature after the rolling process in rolling stand no. 1:
a) thermogram, b) results of numerical calculations

Zmierzona w warunkach przemysłowych temperatura powierzchni pasma (od strony walców) wynosiła w tym przypadku około 1015°C. Temperatura powierzchni pasma po procesie walcowania w klatce walcowniczej nr 1, obliczona numerycznie, wynosiła natomiast około 1030°C. Stwierdzono dużą zbieżność zmierzonych oraz obliczonych wartości temperatury.

Wyniki podobnych badań przedstawiono między innymi w pracy [11]. Stwierdzono, że wartości temperatur uzyskane podczas modelowania numerycznego z dużą dokładnością odpowiadają wartościom zmierzonym podczas rzeczywistego procesu walcowania. Różnice pomiędzy średnią wartością temperatury pasma obliczoną numerycznie oraz zmierzoną w warunkach przemysłowych nie przekraczały 10%. Na tej podstawie stwierdzono, że przyjęte do modelowania numerycznego parametry początkowe, w tym także temperatura walców, zostały wyznaczone i dobrane prawidłowo.

4. WNIOSKI

Po analizie otrzymanych wyników badań dotyczących możliwości zastosowania techniki termowizyjnej w procesach walcowania stwierdzono, że:

- wartości temperatury walcowanych blach zmierzone przy zastosowaniu techniki termowizyjnej w pewnych przypadkach znacznie różniły się od wartości zmierzonych za pomocą pirometrów;
- błędny odczyt temperatury walcowanego materiału z wykorzystaniem punktowego pomiaru pirometrem, w przypadku manualnego sterowania procesem walcowania, może być przyczyną niejednorodności własności mechanicznych wyrobu gotowego, w wyniku jego odkształcania przy różnych temperaturach;
- w wyniku intensywnego odkształcania badanego w pracy stopu aluminium większy efekt cieplny wystąpił podczas walcowania skośnego prętów z wsadu o temperaturze 200°C;
- w analizowanych procesach walcowania w wykrojach, z wykorzystaniem walców żeliwnych średnia temperatura ich powierzchni wyno-

The temperature of the band surface (on the roll side), measured in industrial conditions, was in this case around 1015°C. On the other hand, the band surface temperature after the process of rolling in rolling stand no.1, as computed numerically, was about 1030°C. A good agreement between the measured and computed temperature values was found.

The results of similar investigations are provided, e.g., in study [11]. It was found that band temperature values obtained from numerical modelling corresponded with high accuracy to the values measured during the actual rolling process. Differences between the average band temperature values computed numerically and measured in industrial conditions did not exceed 10%. From the above, it was concluded that the initial parameters taken for numerical modelling, including the roll temperature, had been determined and selected correctly.

4. CONCLUSIONS

From the analysis of the obtained investigation results concerning the possibility of using the thermovision technique in rolling processes, the following has been found:

- *the values of rolled plate temperature, measured using the thermovision technique, in some instances differed considerably from the values measured with pyrometers;*
- *an erroneous rolled material temperature reading by spot measurement taken with a pyrometer, in the case of the manual control of the rolling process, may be the cause of inhomogeneities of the mechanical properties of finished product due to its deformation at varying temperatures;*
- *as a result of the intensive deformation of the aluminum alloy investigated in this study, a greater thermal effect occurred during skew rolling of bars from feedstock at a temperature of 200°C;*
- *in the examined processes of groove rolling using cast iron rolls, the average roll surface temperature was around 60°C, while in the case*

siła około 60°C, natomiast w przypadku zastosowania walców z pierścieniami wykonanymi z węglików spiekanych temperatura ich powierzchni wahała się w granicach od około 65°C do około 80°C;

- duża zbieżność pomiędzy wartościami temperatur pasma obliczonymi numerycznie i zmierzonymi w warunkach rzeczywistych, świadczy o wysokiej dokładności przeprowadzonych pomiarów termowizyjnych.

of using rolls with sintered carbide rings, their surface temperature ranged from around 65°C to around 80°C;

- *the great concurrence of the band temperature values computed numerically and measured under real conditions gives evidence of a high accuracy of the thermovision measurements carried out.*

PODZIĘKOWANIA

BS/PB-201-302/2018 – „Wytwarzanie, przetwórstwo i zastosowanie materiałów funkcjonalnych”.

LITERATURA

- [1] Laber K. 2008. *Modelowanie i optymalizacja procesów regulowanego walcowania i kontrolowanego chłodzenia wyrobów walcowni bruzdowych*. Praca doktorska, Częstochowa.
- [2] Minkina W. 2004. *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [3] Minkina W., Rutkowski P., Wild W. 2000. „Podstawy pomiarów termowizyjnych. Cz. I - Istota termowizji i historia jej rozwoju”. *Pomiary Automatyka Kontrola* 46(1): 7-10.
- [4] User's manual: FLIR 640 series, FLIR Systems, June 30, 2008, publication no. 1558550.
- [5] Kułakowska A. 2017. *Kształtowanie własności prętów ze stopu aluminium AlZn5,5MgCu w trójwalcowej walcierce skośnej*. Praca doktorska, Częstochowa.
- [6] Laber K., Dyja H. 2009. *Przemysłowe badania temperatury walców podczas walcowania prętów okrągłych w walcowni ciągłej, Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej*. Częstochowa.
- [7] Ražnjević K. 1966. *Tablice cieplne z wykresami*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [8] Ozaki Yo, Zee Ralph H. 1995. „Investigation of thermal and hydrogen effects on emissivity of refractory metals and carbides”. *Material Science and Engineering A202*: 134-141.
- [9] Smid I., Akiba M., Vieider G., Plochl L. 1998. „Development of tungsten armor and bonding to copper for plasma-interactive components”. *Journal of Nuclear Materials* 258-263: 160-172.

ACKNOWLEDGEMENTS

BS/PB-201-302/2018 – „Wytwarzanie, przetwórstwo i zastosowanie materiałów funkcjonalnych”.

REFERENCES

- [1] Laber K. 2008. *Modelowanie i optymalizacja procesów regulowanego walcowania i kontrolowanego chłodzenia wyrobów walcowni bruzdowych*. PhD thesis, Częstochowa.
- [2] Minkina W. 2004. *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [3] Minkina W., Rutkowski P., Wild W. 2000. „Podstawy pomiarów termowizyjnych. Cz. I - Istota termowizji i historia jej rozwoju”. *Pomiary Automatyka Kontrola* 46(1): 7-10.
- [4] User's manual: FLIR 640 series, FLIR Systems, June 30, 2008, publication no. 1558550.
- [5] Kułakowska A. 2017. *Kształtowanie własności prętów ze stopu aluminium AlZn5,5MgCu w trójwalcowej walcierce skośnej*. Praca doktorska, Częstochowa.
- [6] Laber K., Dyja H. 2009. *Przemysłowe badania temperatury walców podczas walcowania prętów okrągłych w walcowni ciągłej, Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej*. Częstochowa.
- [7] Ražnjević K. 1966. *Tablice cieplne z wykresami*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [8] Ozaki Yo, Zee Ralph H. 1995. „Investigation of thermal and hydrogen effects on emissivity of refractory metals and carbides”. *Material Science and Engineering A202*: 134-141.
- [9] Smid I., Akiba M., Vieider G., Plochl L. 1998. „Development of tungsten armor and bonding to copper for plasma-interactive components”. *Journal of Nuclear Materials* 258-263: 160-172.

- [10] Trimble Ch., De Vries M., Hale J.S., Thompson D.W., Tiwald T.E., Woollam J.A. 1999. „Infrared emittance modulation devices using electrochromic crystalline tungsten oxide, polymer conductor, and nickel oxide,” *Thin Solid Films* 355-356: 26-34.
- [11] Mróz S., Sikora K., Janikowski B. 2005. „Symulacja i doświadczalne badanie procesu walcowania prętów żebrowanych z wzdłużnym podziałem pasma”. W materiały konferencyjne *Walcownictwo 2005*, 19-21 października 2005 r., Ustroń, 109-114. Kraków: Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków .
- [10] Trimble Ch., De Vries M., Hale J.S., Thompson D.W., Tiwald T.E., Woollam J.A. 1999. „Infrared emittance modulation devices using electrochromic crystalline tungsten oxide, polymer conductor, and nickel oxide,” *Thin Solid Films* 355-356: 26-34.
- [11] Mróz S., Sikora K., Janikowski B. 2005. „Symulacja i doświadczalne badanie procesu walcowania prętów żebrowanych z wzdłużnym podziałem pasma”. W materiały konferencyjne *Walcownictwo 2005*, 19-21 października 2005 r., Ustroń, 109-114. Kraków: Wydawnictwo Naukowe Akapit, Kraków .