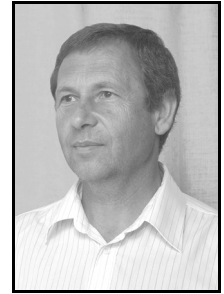


Alina WRÓBEL, Andrzej WRÓBELAGH AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, WYDZIAŁ GEODEZJI GÓRNICZEJ I INŻYNIERII ŚRODOWISKA,
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków**Termografia a korekta pomiarów pionowości kominów stalowych****Dr hab. inż. Alina WRÓBEL**

Absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1979). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskała w 1988, a doktora habilitowanego w 2011 roku. Adiunkt w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa. Jej zainteresowania naukowe to: termografia, geodezja inżynierska, teledetekcja, budownictwo. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 60 publikacji. Wiele z nich dotyczy zastosowania termografii w budownictwie. Hobby: ogrodnictwo.

e-mail: alibel@agh.edu.pl**Dr inż. Andrzej WRÓBEL**

Absolwent Wydziału Geodezji Górniczej Akademii Górniczo-Hutniczej (1977). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 1987 roku. Adiunkt w Katedrze Geoinformacji Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska. Główne zainteresowania zawodowe: fotogrametria zwłaszcza zastosowania fotogrametrii w inwentaryzacji zabytków, geodezja, teledetekcja, termografia. W swoim dorobku naukowym posiada ponad 40 publikacji. Hobby: fotografia.

e-mail: awrobel@agh.edu.pl**Streszczenie**

Nasłonecznienie powoduje ugięcie trzonu kominu i przemieszczenie jego wierzchołka względem położenia spoczynkowego. Opisane w literaturze próby określenia poprawek uwzględniających wpływ nasłonecznienia nie dały w pełni satysfakcjonujących rezultatów. Autorzy niniejszej pracy mierzyli wychylenia osi stalowego kominu przez cały dzień. Na podstawie pomiaru termograficznego wyznaczyli temperaturę płaszcza i obliczyli spodziewane wychylenie wierzchołka spowodowane zróżnicowaniem temperatury. Obliczone wartości były zbliżone do wyników pomiaru geodezyjnego.

Słowa kluczowe: kominy stalowe, wychylenie kominu, temperatura, termografia.

Thermography and correction of steel chimney verticality surveys**Abstract**

Industrial chimneys can be characterized as slim buildings with a vertical axis. The most important part of surveying during chimney construction is making sure that its axis is actually vertical. A chimney should be constructed in such a way that its axis is vertical in the resting position. Conditions like wind and insolation cause deflection of the chimney shaft and displacement of its top from the resting position. If the shape of the chimney axis is measured during a sunny day, the measured values have to be adjusted to take uneven temperature distribution within the chimney shaft into consideration. The change of the object's size caused by a temperature change can be many times larger than the measurement precision. In the past, there were attempts to calculate the adjustments required to counterbalance the effect of insolation that relied on thermography [3, 4, 5], but they did not give fully satisfactory results. The authors of the present paper measured the deflection of the steel chimney axis (Fig. 1) once every hour for one day. At the same time, they captured thermographic images of the chimney shaft surface. They started the measurements before the sunrise, obtaining the deflection in resting position. During the day, the largest chimney top displacement from the resting position was 10 cm (Fig. 2). Using the thermographic images, the authors determined the chimney shaft temperature and calculated the expected chimney top displacement caused by the uneven temperature distribution (formula 1). The calculated values were close to the results of survey (Figs. 5 and 6). The largest difference was 10 mm what equaled to 33% of the permitted deflection for the measured chimney.

Keywords: steel chimneys, chimney deflection, temperature, thermography.

1. Wprowadzenie

Kominy przemysłowe to budowle wysmukłe o pionowej osi. Realizacja pionowej osi budowli to najważniejsze zadanie geodezyjnej obsługi budowy kominu. Budowę kominu należy tak prowadzić by jego oś była pionowa w położeniu spoczynkowym. Czynniki zewnętrzne takie jak wiatr i nasłonecznienie powodują ugięcie trzonu kominu i przemieszczanie jego wierzchołka względem położenia spoczynkowego.

W czasie słonecznego dnia jedna strona trzonu kominu jest nagrzewana promieniowaniem słonecznym a druga pozostaje w cieniu własnym. Powoduje to zróżnicowanie wartości temperatury na obwodzie trzonu kominu. Nasłonecznione tworzące wydłużają się powodując wygięcie trzonu kominu. W efekcie ugięcia wierzchołek kominu przemieszcza się o wartość f opisaną teoretycznym wzorem (1) od położenia spoczynkowego [1]

$$f = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot d} h^2 \quad (1)$$

gdzie: f - wychylenie osi wierzchołka kominu, α - współczynnik rozszerzalności, ΔT - różnica temperatury po dwóch stronach kominu, d - średnica kominu, h - wysokość kominu.

Dobowa wędrówka słońca powoduje zataczanie przez wierzchołek kominu pewnej krzywej zamkniętej zależnej od kierunku i intensywności nasłonecznienia oraz parametrów cieplnych trzonu kominu. Płaszczyzna ugięcia trzonu kominu zazwyczaj nie pokrywa się z kierunkiem padania promieni słonecznych, widoczne jest zjawisko opóźnienia reakcji budowli na zmianę warunków termicznych.

W przypadku budowli żelbetowych wyższych niż 60 m pionowanie należy przeprowadzać przed wschodem słońca lub przy pochmurnej pogodzie [1]. Jeżeli zachodzi konieczność wyznaczenia kształtu osi kominu w czasie słonecznego dnia należy wprowadzać poprawki uwzględniające zróżnicowaną temperaturę płaszcza kominu. „Wyznaczenie tych poprawek jest najtrudniejszym problemem geodezyjnej obsługi budownictwa wieżowego” [1]. Poprawki te wyznaczano z obserwacji geodezyjnych prowadzonych w dniu pionowania budowli i rozpoczętych przed wschodem słońca.

Kominy stalowe montuje się z gotowych segmentów. Montaż konstrukcji kominu stalowego na miejscu przeznaczenia trwa od kilku godzin do kilku dób. Jest to przedsięwzięcie, które musi być dużo wcześniej planowane i zabezpieczone logistycznie. Nie ma możliwości zaplanowania takiego terminu prac montażowych, aby nie było wpływu nasłonecznienia.

Dopuszczalne odchyłki osi kominu od linii pionu podczas montażu zależą od rodzaju konstrukcji kominu i wynoszą 30 mm dla kominów stalowych o wysokości H nie przekraczającej 50 m, a $0,0006 \cdot H$ gdy $H > 50$ m [2]. Wartości tych odchyłek dotyczą spoczynkowego położenia kominu.

W przypadku prowadzenia montażu w czasie słonecznego dnia należałoby uwzględnić poprawki z tytułu sprężystego wychylenia osi kominu spowodowanego jednostronnym jego nagrzaniem. Teoretycznie można wyznaczyć wartość wychylenia wierzchołka osi kominu spowodowaną jednostronnym nagrzaniem trzonu na podstawie znajomości aktualnego rozkładu temperatury i wymiarów kominu. Jedynym sposobem szybkiego określenia rozkładu temperatury na powierzchni kominu w czasie jego montażu jest technika termograficzna.

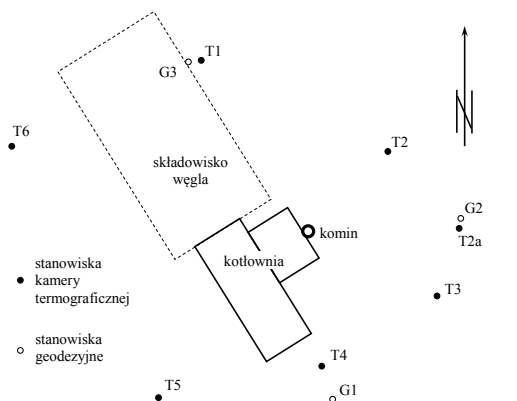
Odchylenia osi trzonu komina od linii pionu wyznaczone są również w pomiarach inwentaryzacyjnych wykonywanych na potrzeby opracowania ekspertyz technicznych kominów. Powinny być one wyznaczone z dużą dokładnością. Średni błąd kwadratowy wyznaczenia wychylenia wierzchołka komina, będący miarą dokładności pomiarów powinien być kilkukrotnie mniejszy od takiej wartości wychylenia, którą można by uznać za istotną [3].

Praktycznie osiągalny błąd średni pomiaru wychylenia komina zależy od wielu czynników: materiału, z którego wykonany jest komin, staranności wykonania zewnętrznej powierzchni trzonu, odchylenia poziomego przekroju komina od kołowości, wysokości komina, warunków atmosferycznych w czasie pomiaru. W przypadku kominów stalowych o wysokości do 120 m (takich w Polsce jest najwięcej) błąd średni pomiaru będzie się wahał od 2 do 20 mm, w zależności od stanu powierzchni komina i warunków pomiaru. Opisane w literaturze wartości zmiany wychylenia osi komina stalowego pod wpływem nasłonecznienia [3] są nieraz wielokrotnie większe niż dopuszczalne odchyłki od pionowości przy pracach montażowych.

Próby wykorzystania termografii do określenia temperatury płaszcza komina i określenia na jej podstawie poprawki do pomiarów geodezyjnych uwzględniającej wpływ nasłonecznienia były podejmowane [3,4, 5], jednak nie dawały w pełni satysfakcjonujących rezultatów.

2. Opis przeprowadzonych badań komina

Badania zmiany kształtu pod wpływem nasłonecznienia przeprowadzono dla komina stalowego o wysokości 30 m. Jest to walec o średnicy 0,81 m nie posiadający w środku wymurówki ani żadnej warstwy izolacyjnej. Zlokalizowany jest obok budynku kotłowni o wysokości około 8 m (rys. 1). Z pozostałych trzech stron komina horyzont jest odkryty. W czasie prowadzonych pomiarów komin był wyłączony z eksploatacji.



Rys. 1. Szkic rozmieszczenia stanowisk pomiarowych
Fig. 1. The sketch of survey station positions

Wychylenia trzonu komina mierzone były równocześnie z trzech stanowisk (rys. 1) z wykorzystaniem tachimetrów elektronicznych. Oprócz autorów w pomiarze geodezyjnym brało udział dwóch studentów przygotowujących prace dyplomowe.

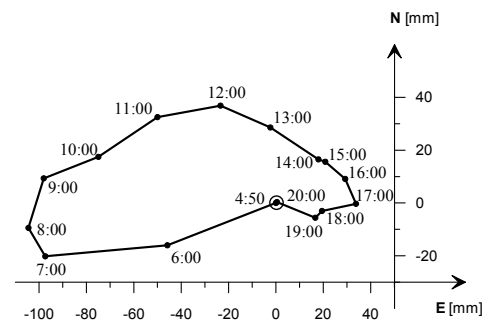
Pierwszą serię pomiarową wykonano o godzinie 4:50, tuż przed wschodem słońca rejestrując położenie spoczynkowe komina. Następne serie powtarzano co jedną godzinę. Wykonano w sumie szesnaście serii pomiarowych. Równocześnie z pomiarem geodezyjnym wychylenia wykonywano zobrazenia termograficzne powierzchni płaszcza komina. W trzech pierwszych seriach powierzchnię komina rejestrowano z siedmiu stanowisk kamery (rys. 1), a w następnych z sześciu (opuszczono stanowisko 2a).

O godzinie 4:50, gdy mierzono stan spoczynkowy, temperatura powietrza wynosiła 8°C. O godzinie 5:12 weszło słońce. Temperatura powietrza w cieniu zaczęła szybko wzrastać osiągając wartość 18°C o godzinie 7:00, a 25,5°C o godzinie 9:00. Do godziny 10:00 było bezchmurnie i bezwietrznie lub wiał słaby

wiatr o prędkości około 1m/s. O godz. 10:00 temperatura powietrza w cieniu wynosiła 26,5°C. Później wiatr zaczął się wzmacniać osiągając prędkość 3 – 4 m/s. O godzinie 11:00 temperatura powietrza w cieniu osiągnęła wartość około 30°C i ustabilizowała się. Około godziny 13:00 od strony zachodniej zaczęło się lekko chmurzyć. O godzinie 16:00 słońce nie świeciło już bezpośrednio lecz przez cienką warstwę chmur wysokich. Temperatura powietrza w cieniu wynosiła wówczas 29°C i od tego momentu zaczęła się stopniowo obniżać. O godzinie 20:00 gdy wykonywano ostatnią serię pomiarową temperatura powietrza osiągnęła wartość 23°C. W czasie ostatnich dwóch serii pomiarowych (o godzinie 19:00 i 20:00) warstwa chmur wysokich była już dość gęsta, ale słońce jeszcze lekko przez nie przeświecało.

3. Wyznaczenie wychylenia osi wierzchołka komina

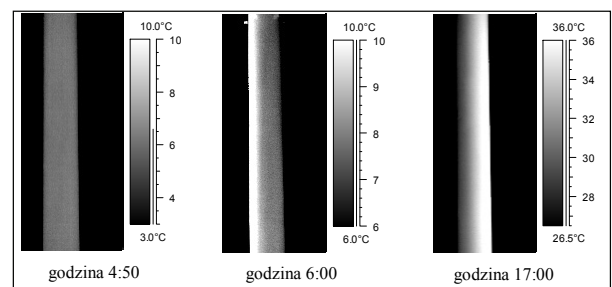
Na podstawie pomiarów geodezyjnych wyznaczono ślad dobowej wędrowki wierzchołka komina przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres dobowej wędrowki wierzchołka komina
Fig. 2. A graph of changes of the chimney top displacement during the day

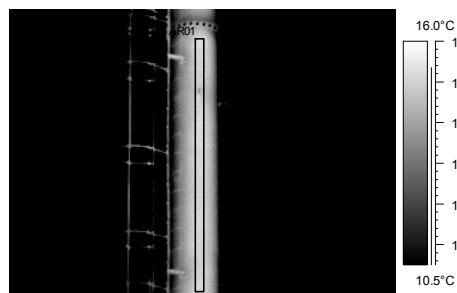
Największe wychylenie wierzchołka komina od stanu spoczynkowego wystąpiło w godzinach od 7:00 do 9:00, a jego maksymalna wartość wynosiła 104 mm.

O godzinie 20:00 położenie wierzchołka komina pokryło się z jego położeniem wyznaczonym o godzinie 4:50 (przed wschodem słońca) – to położenie przyjęte zostało jako spoczynkowe. Odchylenie od położenia spoczynkowego wierzchołka komina to efekt sprężystego ugięcia jego trzonu spowodowany jednostronnym nasłonecznieniem – (rys. 3).



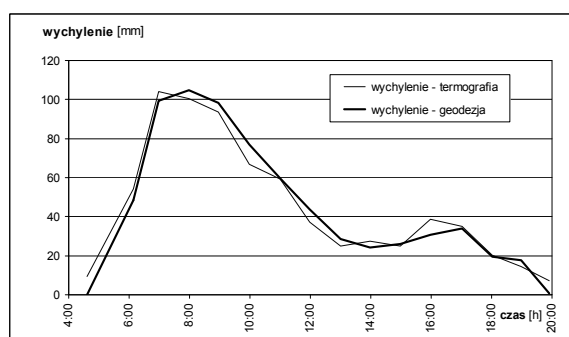
Rys. 3. Termogramy komina stalowego w różnych porach dnia
Fig. 3. Thermograms of the steel chimney at different times of day

Wartości wychylenia wierzchołka komina obliczono ze wzoru (1). Różnicę temperatury wyznaczono termograficznie pomiędzy tworzącymi o minimalnej i maksymalnej jej wartości. Emisyjność powierzchni płaszcza komina wyznaczono laboratoryjnie dla próbki blachy stalowej pomalowanej tym samym lakierem co komin. Wartość temperatury wyznaczono na każdym termogramie fragmentu komina, jako średnią w polu pomiarowym obejmującym środkowe tworzące widoczne z danego stanowiska. W przypadku, gdy maksymalna wartość temperatury nie pokrywała się ze środkowymi tworzącymi pole pomiarowe obejmowało obszar najwyższych wartości temperatury jak pokazano na rysunku 4.

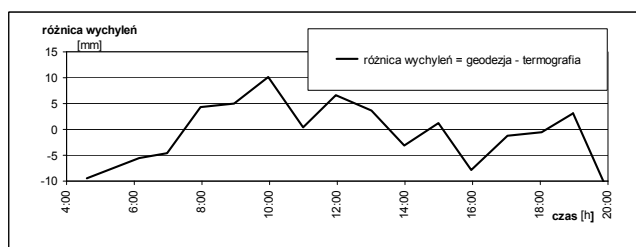


Rys. 4. Lokalizacja pola pomiarowego na termogramie
Fig. 4. Location of measurements on a thermogram

Obliczone wychylenia trzonu kominia osiągają wartości zbliżone do wyznaczonych bezpośrednio z pomiarów geodezyjnych, co przedstawione jest na rysunku 5. Współczynnik korelacji pomiędzy nimi wynosi 0,987.



Rys. 5. Wartości zmian wychylenia wierzchołka kominia względem stanu spoczynkowego
Fig. 5. The values of the chimney top displacement from the resting position



Rys. 6. Różnice pomiędzy wartościami wychylenia wierzchołka kominia wyznaczonymi z pomiaru geodezyjnego a obliczonymi na podstawie pomiaru termograficznego
Fig. 6. Differences between the chimney top deflection measured and calculated from thermographic images



Rys. 7. Termogram kominia częściowo zacienionego
Fig. 7. Thermogram of a partially shaded chimney

Różnice pomiędzy wartościami wychylenia wierzchołka kominia wyznaczonymi z pomiaru geodezyjnego a obliczonymi na podstawie pomiaru termograficznego nie przekraczają 10 mm (rys. 6), co stanowi 1/3 dopuszczalnego wychylenia wierzchołka tego kominia w czasie montażu. Odchylenie standardowe tych różnic wynosi 6,0 mm.

Kminy przemysłowe znajdują się zazwyczaj w sąsiedztwie innych obiektów budowlanych i w niektórych porach dnia ich dolna część może być zacieniona. Zróżnicowanie rozkładu temperatury nie obejmuje wtedy całej wysokości kominia – rys. 7. Ten fakt należy uwzględnić w obliczeniu wygięcia trzonu.

4. Wnioski

„...Najtrudniejszym, a przy tym najważniejszym problemem pomiaru pionowości jest eliminacja sprężystych odkształceń dobowych, które mogą całkowicie wypaczyć obraz aktualnego stanu obiektu” [1].

Pomiary geodezyjne pionowości kominia wykonane przed wschodem słońca lub w pochmurny dzień odnoszą się do stanu spoczynkowego. Z wyników pomiarów geodezyjnych dotyczących pionowania budowanych kominów w słoneczne dni powinny zostać wyeliminowane odkształcenia spowodowane nasłonecznieniem. Eliminacja tych sprężystych odkształceń jest możliwa poprzez rozpoczęcie prowadzenia obserwacji geodezyjnych przed wschodem słońca. W przypadku montażu kominia stalowego jedyną możliwością określenia wielkości wygięcia sprężystego spowodowanego nasłonecznieniem to jego obliczenie na podstawie aktualnego rozkładu temperatury trzonu.

Wchylenie spowodowane nasłonecznieniem zależy od intensywności nasłonecznienia i od temperatury powietrza. Mimo że od godziny 4:50 do godziny 14:00 słońce grzało coraz mocniej to już o godzinie 7:00 wzrost wychylenia kominia został praktycznie zatrzymany (temperatura powietrza wynosiła wówczas 18°C) a od godziny 9:00 wychylenie zaczęło się zmniejszać osiągając o godzinie 12:00 (około 40 minut przed lokalnym południem) połowę wartości maksymalnej. Wyraźne zmniejszenie wartości wychylenia nastąpiło, mimo, że w dalszym ciągu było bezchmurnie i słońce mocno grzało (temperatura powietrza w cieniu osiągnęła 30°C). Częściowo mógł tu mieć znaczenie fakt, że od godziny 10:00 mocniej wiał wiatr. Jak z tego widać temperatura płaszcza kominia nagrzewanego słońcem zależy od wielu czynników. W związku z tym nie da się inaczej ocenić temperatury powierzchni kominia niż za pomocą pomiaru termograficznego.

Przeprowadzone badania wykazały zadowalającą zgodność pomierzonych i obliczonych wartości wychylenia kominia spowodowanych nasłonecznieniem. Dotyczy to tylko kominów stalowych bez wymurówki charakteryzujących się małą pojemnością i dobrą przewodnością cieplną, reagujących szybko na zmieniające się naprężenia termiczne. Podobne badanie dotyczące kominia stalowego z wymurówką [4] nie wykazało, bowiem tak dobrej zgodności.

Praca niniejsza została wykonana w ramach badań statutowych nr AGH 11.11.150.949; 11.11.150.005.

5. Literatura

- [1] Praca zbiorowa: Geodezja inżynierska, Tom II, - Żak M.: rozdz. 6 Obsługa geodezyjna przemysłowego budownictwa wieżowego. PPWK, Warszawa 1994.
- [2] Norma PN-B-06200 Konstrukcje stalowe budowlane. Warunki Wykonania i odbioru. Wymagania podstawowe. Polski Komitet Normalizacyjny, 1997.
- [3] Wróbel A., Wróbel A., Kędziński M.: Termografia w pomiarach inwentaryzacyjnych kominów przemysłowych – cz. I i II. Polska Izba Inżynierów Budownictwa, Inżynier budownictwa nr 02 i 03 /2012.
- [4] Wróbel A.: Wykorzystanie termowizji w pomiarach inżynierskich obiektów przemysłowych. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 1987.
- [5] Kociarz R. Puniach E. Sukta O.: Wpływ dobowych zmian temperatury na wyniki geodezyjnych pomiarów wychyleń trzonu kominia przemysłowego. Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii, tom II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Wrocław 2011.