

Skanywanie laserowe w monitoringu obiektów powłokowych

Dr inż. Rafał Gawałkiewicz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

1. Wprowadzenie

Chłodnie kominowe (hiperboloidalne, żelbetowe) stanowią jeden z podstawowych obiektów elektrowni kondensacyjnych z obiegowym systemem chłodzenia pełniąc rolę kontaktowego, mokrego wymiennika ciepła. Wewnątrz budowli następuje schładzanie wody technologicznej poprzez wymianę ciepła pomiędzy nią i powietrzem atmosferycznym. Wynika to z kontaktu „rozdeszczonej” cieczy o temperaturze T_{H_2O} z przepływającym strumieniem powietrza o temperaturze T_p wywołanym naturalnym ciągiem komina, który jest tym większy, im wyższy jest komin oraz im wyższa jest różnica temperatur $\Delta T = T_{H_2O} - T_p$. Schłodzona ciecz powraca ponownie do układu chłodzenia skraplacza turbiny.

W chwili obecnej nowym przeznaczeniem żelbetowych chłodni hiperboloidalnych jest odprowadzenie ochłodzonych, odpylonych i odsiarczonych spalin kotłowych do atmosfery.

Chłodnia jako urządzenie wielokubaturowe dzięki swojemu kształtowi zapewnia dobre efekty eksploatacyjne przy ograniczonym użyciu materiałów konstrukcyjnych, tj. stali i betonu. Niewielkie wymiary przekroju powłoki przy znaczących wymiarach budowli, ciężarze własnym oraz funkcją jaką spełnia w procesie technologicznym decydują o tym, że zarówno na etapie wznoszenia, jak i w trakcie eksploatacji podlega bardziej rygorystycznym normom i wymaga stosowania bardzo precyzyjnych instrumentów i technik pomiarowych. Konieczne jest wtedy dokładne zachowanie projektowych wymiarów, zaś dopuszczanie w niewielkim stopniu odstępstw budowlanych w odniesieniu do założeń projektowych kształtu i wymiarów może być nawet przyczyną katastrofy, co już wielokrotnie zostało udokumentowane.

Dotychczas znanych i powszechnie stosowanych jest szereg metod „bezdotykowych” inwentaryzacji stanu obiektów powłokowych począwszy od klasycznych metod geodezyjnych po techniki fotogrametrii inżyniersko-przemysłowej. Służą one zarówno do wysokodokładnych inwentaryzacji przemieszczeń, jak również deformacji strukturalnych elementów wielkopowierzchniowych tych budowli, tj. powłok.

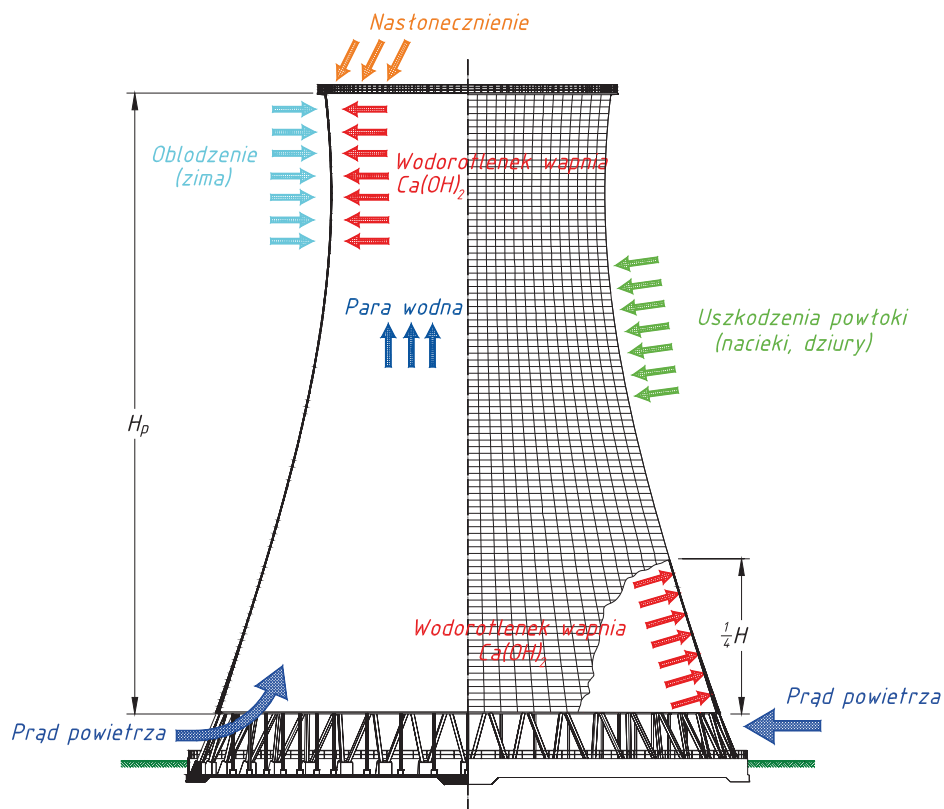
Ogromną rolę w procesie badania przemieszczeń szybkozmiennych oraz dynamicznych zmian geometrii mierzonych obiektów lub ich elementów, jak dotąd (z uwagi na szybkość pozyskiwania danych – zdjęć, tym samym krótki czas trwania prac polowych i równoczesność fotografowania wszystkich szczegółów), odgrywa technika fotogrametrii. W chwili obecnej nowoczesna technika skaningu laserowego ma szansę ze względu na szybkość pozyskiwania szczegółowych danych punktowych łatwych do interpretacji bezpośrednio po zakończeniu pomiarów, zdetronizować technikę fotogrametrii. Przyjęcie minimalnego kroku pomiarowego, tj. zagęszczenie obserwacji umożliwia bardzo szczegółowe odwzorowanie rzeczywistego kształtu inwentaryzowanego obiektu. W artykule skupiono się głównie na prezentacji metodyki analizy danych skaningowych dla zobrazowania wielkości deformacji kształtu inwentaryzowanej chłodni hiperboloidalnej nr 2 w Elektrociepłowni „Kraków”.

2. Czynniki wpływające na wielkość deformacji powłoki chłodni hiperboloidalnej

Chłodnie hiperboloidalne należą do obiektów charakteryzujących się [3]:

- bardzo cienką powłoką w stosunku do rozmiarów budowli – grubość powłoki inwentaryzowanej chłodni waha się w granicach $0,14 \div 0,54$ m;
- znaczącą kubaturą – wymiary inwentaryzowanej chłodni: wysokość powłoki 93 m, zewnętrzny promień podstawy powłoki $R_z = 37,900$ m;
- niewielkim ciężarem własnym konstrukcji żelbetowego płaszcza w odniesieniu do jego maksymalnych wymiarów – przy założeniu średniej gęstości objętościowej żelbetu 2500 kg/m^3 [2] i kubaturze mierzonej powłoki $2797,63 \text{ m}^3$, jej ciężar wynosi $6994,1$ t.

Zachowanie stateczności tak delikatnej budowli w czasie jej użytkowania przy założeniu maksymalnego obciążenia możliwe jest dzięki ciągłości konstrukcji oraz idealnemu dotrzymaniu założonego kształtu. Jednak istnieje szereg czynników, od których zależy kształt płaszcza oraz wielkość zmian jego geometrii w czasie. Do zjawisk i czynników kształtujących strefy deformacji powłoki należą:



Rys. 1. Półprzekrój przez chłodnię – zjawiska i czynniki kształtujące strefy deformacji powłoki

- błędy wykonawstwa powłoki na etapie budowy obiektu;
- niedokładność geodezyjnego pomiaru realizacyjnego;
- nierównomierność osiadania chłodni;
- wpływ obciążenia konstrukcji urządzeniami i instalacjami technologicznymi;
- wpływ wiatru i zmian termicznych w trakcie budowy i eksploatacji;
- dobowych odkształceń związanych z nastonecznieniem i parciem wiatru;
- odkształcenia i uszkodzenia eksploatacyjne powłoki.

Graficzną interpretację zjawisk i czynników atmosferycznych kształtujących strefy deformacji powłoki ilustruje rysunek 1.

3. Propozycja metodyki analizy danych skaningowych powłoki chłodni hiperboloidalnej

Doskonałe rezultaty w opisie rzeczywistego kształtu powłoki uzyskuje się wykorzystując tachimetry skanujące lub skanery laserowe. Pomiar skaningowy kształtu chłodni kominowej dostarcza informacji o odchyłkach projektowych (odstępstwach od projektowanej hiperboloidy) na etapie zarówno wznoszenia obiektu, jak i w trakcie eksploatacji w odniesieniu do zdefiniowanej matematycznie w projekcie powierzchni hiperboloidy obrotowej oraz osi pionowej.

Zatem jeżeli wzorcem odniesienia będzie projekt chłodni, wówczas złożenie modelu teoretycznego

i pomierzonego uwzględni zmiany w kształcie powłoki (odstępstwa od projektu) wywołane czynnikami i zjawiskami oddziałującymi w trakcie wznoszenia i późniejszej eksploatacji obiektu.

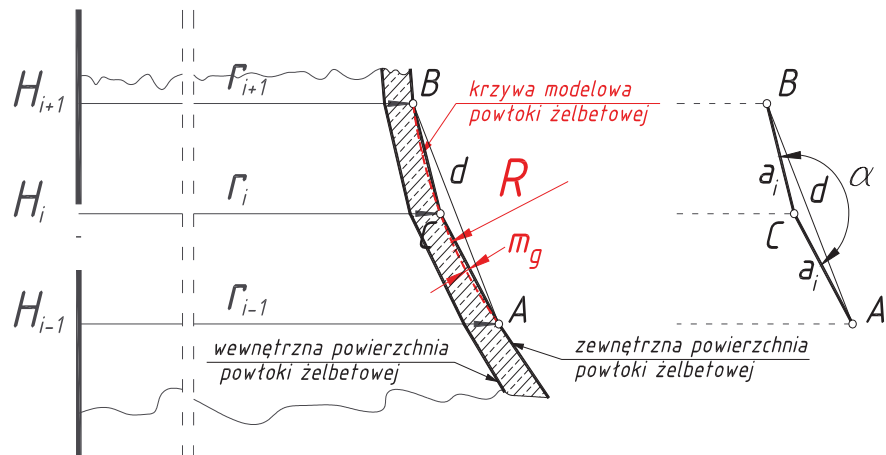
Wyznaczenie na podstawie obserwacji geodezyjnych dolnej krawędzi płaszcza chłodni drogą aproksymacji (metodą najmniejszych kwadratów MNK) parametrów okręgu definiującego podstawę powłoki, umożliwia porównanie modelu teoretycznego (z projektu) i rzeczywistego (z pomiaru). Ponadto, taki sposób analizy zapewnia dodatkowo kontrolę geometrii podstawy (kołowości).

Przystępując do inwentaryzacji deformacji żelbetowej powłoki chłodni analizie podlega kształt pionowego przekroju zewnętrznej powierzchni, która w rzeczywistości nie jest hiperbolą projektowaną. Matematyczny opis uzyskuje na etapie projektowania chłodni wewnętrzna powierzchnia budowli, niewidoczna podczas prowadzonych inwentaryzacji geodezyjnych w trakcie jej użytkowania. W praktyce powłoka składa się zazwyczaj z około 100 stożków ściętych o wysokości około $1 \div 1,2$ m, w zależności od wielkości chłodni. Inwentaryzowana przez autora chłodnia, przedstawiona na rysunku 2, zdefiniowana została przez konstruktorów 93 pierścieniami o wysokości 1 m każdy. Zatem można przyjąć, że krawędź dowolnego przekroju pionowego odwzorowana jest w formie linii łamanej, co także wynika z technologii budowy powłoki, tj. kształtu form płytowych stosowanych szalowań – rys. 3.

Przyjęcie modelu generalizacji (linii łamanej opisującej przebieg tworzącej) uzasadnia wzór (2.1):



Rys. 2. Widok chłodni hiperboloidalnej nr 2 Elektrociepłowni „Kraków” – inwentaryzacja tachimetrem skanującym VX firmy Trimble



Rys. 3. Sposób analizy danych – różnice wynikające z przyjętego modelu powłoki m_g – błąd generalizacji modelu; promień krzywizny: $R = \frac{d}{2\sin\alpha}$

$$m_g = \frac{d}{2\sin\alpha} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{d^2}{\sin^2\alpha} - a_i^2} \quad (2.1)$$

gdzie:

- d – odległość pomiędzy skrajnymi punktami definiującymi krzywiznę;
- α – kąt pomiędzy dwoma sąsiednimi odcinkami definiującymi krawędź powłoki;
- a_i – długości odcinków tworzących profil zewnętrzny przekroju powłoki (zgodnie z projektem).

Dla krzywizn inwentaryzowanego obiektu błąd m_g waha się w przedziale wartości $0,0 \div 3,6$ mm (średnia wartość 1,0 mm). Przy założeniu dla instrumentu VX dokładności pomiaru odległości ± 3 mm + 2 ppm (dla powierzchni prostopadłych o dobrych właściwościach odbijających) wielkość błędu m_g zawiera się w przedziale dokładności samego instrumentu.

W praktyce pomiar deformacji chłodni obejmuje przede wszystkim monitoring:

- wielkości osiadania reperów zamocowanych u podstaw wybranych skośnych słupów posadowionych na pierścieniowej ławie fundamentowej lub górnej powierzchni ściany zbiornika wykonywanej metodą niwelacji precyzyjnej;
- kształtu powłoki i jej zmian w postaci obserwacji krawędzi powłoki lub specjalnie oznakowanych na jej powierzchni punktów obserwacyjnych i punktów osnowy pomiarowej.

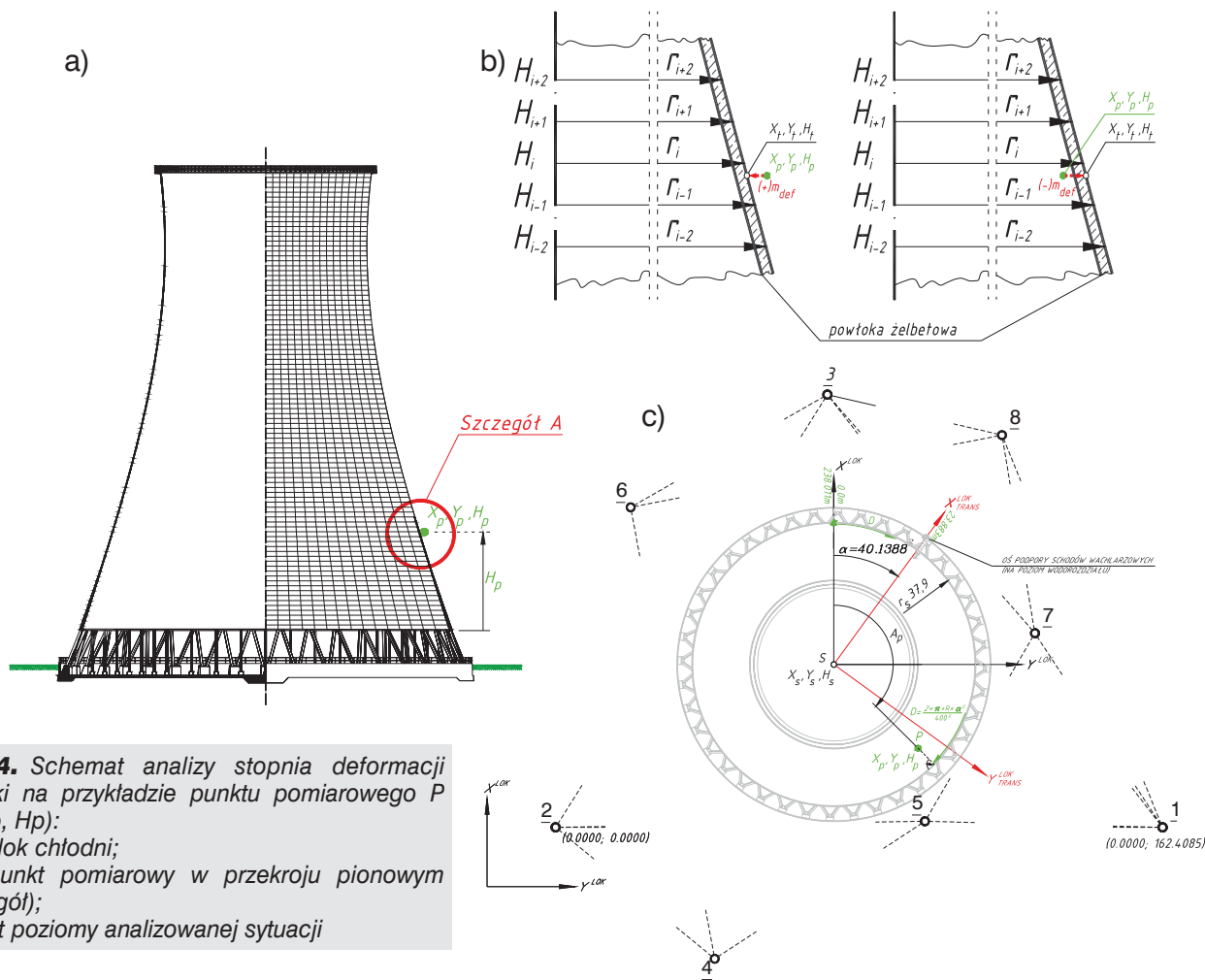
W chwili obecnej automatyzacja procesów pomiarowych, zasięg i wysoka dokładność pomiarów bezzwierciadlanych umożliwiają pozyskiwanie dużej ilości wiarygodnych danych (rys. 4), które precyzyjnie opisują charakter zmian w geometrii inwentaryzowanego obiektu. Zmiany te wynikają z wielkości samej powłoki i jej delikatnej, podatnej na czynniki zewnętrzne kon-

strukcji (zwłaszcza w okresie letnim zakres wahań termicznych powłoki ocenia się na $40 \div 50^\circ$ [1]). Zatem pomiar powłoki żelbetowej chłodni sprowadza się do określenia współrzędnych przestrzennych XYH: wybranych punktów sygnalizowanych trwale na powierzchni (pomiar selektywny) na całej powierzchni powłoki (metoda przestrzennych wcięć w przód lub biegunowa – pomiar bezzwierciadlany); dużej liczby punktów definiujących bezpośrednio kształt powłoki poprzez pomiar kompleksowy prowadzony w sposób automatyczny krokowy (przypadkowy) przy zadanej rozdzielczości pomiaru, przy wykorzystaniu skanerów lub tachymetrów skanujących. Dla pomiaru powłoki w trybie automatycznym (przypadkowe kierunki pomiaru zgodne z przyjętym krokiem pomiarowym i zaznaczonym obszarem skanowania) wielkość deformacji żelbetowego płaszcza w punkcie (w przyjętym układzie lokalnym X^{LOK} , Y^{LOK}) określa zależność (2.2):

$$m_{def} = r_{pom} - r_{teor} = \sqrt{((X_p - X_s)^2 + (Y_p - Y_s)^2)} - \left[\frac{H_p - \left(H_i - \left(\frac{H_{i+1} - H_i}{r_{i+1} - r_i} \right) \cdot r_i \right)}{\frac{H_{i+1} - H_i}{r_{i+1} - r_i}} \right] \quad (2.2)$$

gdzie:

X_s, Y_s, H_s – współrzędne środka dolnej krawędzi hiperboloidalnej powłoki chłodni wyznaczone w drodze wpasowania okręgu w zbiór punktów definiujących jej krawędź metodą najmniejszych kwadratów (MNK); X_p, Y_p, H_p – współrzędne przestrzenne punktu odwzorowującego rzeczywistą geometrię powłoki (współrzędne uzyskane z pomiaru);



Rys. 4. Schemat analizy stopnia deformacji powłoki na przykładzie punktu pomiarowego P (X_p, Y_p, H_p):
 a – widok chłodni;
 b – punkt pomiarowy w przekroju pionowym (szczegół);
 c – rzut poziomy analizowanej sytuacji

H_p, H_{i+1} – wysokości sąsiednich płaszczyzn poziomych ograniczających określony fragment profilu projektowego;

r_p, r_{i+1} – promienie zewnętrzne powłoki określone dla wysokości H_i i H_{i+1} – zgodnie z projektem.

Najlepszym sposobem wizualizacji rozkładu wielkości deformacji całej powierzchni hiperboloidalnej powłoki chłodni jest rzutowanie punktów mierzonych na pobocznicy walca o podstawie zgodnej z wielkością podstawy powłoki chłodni, a następnie rozwinięcie pobocznicy na płaszczyźnie. W praktyce taki algorytm w sposób czytelny pozwala ukazać zmiany geometrii chłodni w formie mapy rozkładu wielkości deformacji. Rozwinięcie danych wzdłuż prostej tożsamej z dolną krawędzią powłoki (lub podstawy walca) w przyjętym lokalnym układzie współrzędnych $X^{LOK} - Y^{LOK}$ zgodnie z rys. 4c umożliwia zależność (2.3):

$$D_p = \frac{2\pi \cdot r_s \cdot A_p}{400^g} \quad (2.3)$$

gdzie:

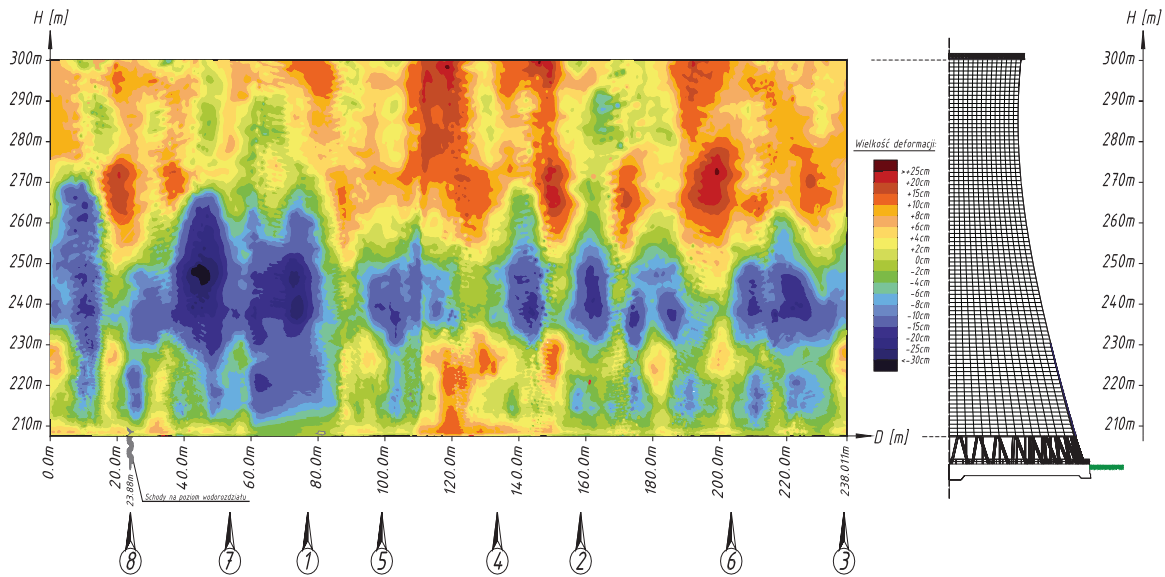
r_s – promień okręgu dolnej krawędzi hiperboloidalnej powłoki chłodni aproksymowany MNK na podstawie zbioru punktów ją definiujących;

A_p – azymut ramienia wodzącego w przyjętym układzie współrzędnych definiowany przez pomierzony punkt P i środek podstawy powłoki S;

Prezentowane rozwiązanie umożliwia dowolną transformację układu punktów $X^{LOK} - Y^{LOK}$ do nowego, nadrzędnego układu współrzędnych $X^{LOK TRANS} - Y^{LOK TRANS}$ – rys. 4c. W przypadku braku stałej osnowy pomiarowej oraz powtarzalności pomiaru w kolejnych cyklach pomiarowych elementem precyzyjnie orientującym poszczególne zbiory danych mogą być środki podpór schodów łączących powierzchnię terenu z poziomem wodorozdziału chłodni. Określenie azymutu środka podstawy powłoki – środek podpory schodów definiuje kąt obrotu układu na etapie wzajemnego „dopasowania” danych.

Pomiar powłoki chłodni hiperboloidalnej Elektrociepłowni „Kraków” S.A. wykonano najnowocześniejszym i najszybszym w chwili obecnej na świecie tachimetrem skanującym VX firmy Trimble – rys. 2. Wbudowany serwomotor umożliwia automatyczny pomiar obiektu z prędkością do 15 punktów na sekundę (dla optymalnych warunków pomiaru i tła odbijającego – maksymalnie 54 000 pkt/h).

Przy założeniu warunków zdefiniowanych wzorami: (2.1), (2.2), (2.3) sporządzono mapę deformacji



Rys. 5. Mapa deformacji powłoki hiperboloidalnej chłodni nr 2 Elektrociepłowni „Kraków”

powłoki hiperboloidalnej chłodni nr 2 Elektrociepłowni „Kraków”. Rozkład wielkości deformacji przedstawia rysunek 5.

4. Podsumowanie

W chwili obecnej największe koncerny produkujące nowoczesny sprzęt geodezyjny oferują precyzyjne instrumenty pomiarowe o zasięgach pomiaru odległości ponad 150 m przy zagwarantowaniu wysokiej dokładności pomiaru. Zwłaszcza stosowanie dalmierzy emitujących impulsy o długości fali świetlnej z zakresu bliskiej podczerwieni zwiększa zasięg pomiaru także poprzez ograniczenie wpływu czynników atmosferycznych (nasłonecznienie) na osłabienie mocy sygnału powracającego do układu odbiorczego dalmierza. Zwiększenie zasięgu pomiaru gwarantuje możliwość inwentaryzacji obiektów wysokich, wielkokubaturowych, trudnodostępnych. Wykorzystanie w prezentowanym przykładzie tachimetru skanującego VX Trimble’a zapewniło pokrycie gęstą siatką punktów powierzchni płaszcza żelbetowego chłodni (po odfiltrowaniu do analizy wykorzystano 84773 punkty). Duża liczebność punktów pozwala na łatwą kontrolę obserwacji na etapie filtracji zbioru danych. Definiowalny geometrycznie obiekt oraz stosunkowo niewielki interwał odległości pomiędzy sąsiednimi punktami pomiarowymi stwarzają możliwość pełnej kontroli danych oraz usuwanie punktów, których współrzędne obarczone są wpływem błędów grubych, np. odbicie impulsu od więcej niż jednej powierzchni – wpływ tła).

Przedstawiony w artykule sposób pomiaru nie wymaga stabilizacji stałych punktów osnowy wykorzystywanych w pomiarach cyklicznych w procesie moni-

toringu chłodni. Pomiar kołowości podstawy powłoki pozwala wyznaczyć MNK parametry geometryczne podstawy, która w dalszej części analiz stanowi bazę wpasowania projektu lub danych pomiarowych uzyskanych z poprzednich epok pomiarowych.

Punkty charakterystyczne lub szczegóły trwale związane z obiektem mogą stanowić element dopasowania sytuacyjnego na etapie transformacji poszczególnych zbiorów epok pomiarowych (określenie kąta rotacji). Zaprezentowany w artykule instrument skanujący VX Trimble’a zapewnia krótki czas pomiaru przy zachowaniu dużej liczebności danych, co gwarantuje również wysoką wiarygodność wyników poprzez ograniczenie wpływu zmian atmosferycznych na geometrię powłoki w czasie. Rezultaty przeprowadzonych analiz danych pomiarowych pozwalają stwierdzić, że wielkość zmian geometrii określana parametrem m_{def} waha się od -32 cm (w strefie najmniejszego przekroju poziomego) do $+27$ cm (na wysokości 2/3 wysokości powłoki i w strefie pomostu remontowego wieńczącego płaszcz chłodni).

Artykuł wykonano w ramach pracy nr 18.25.150.810. Praca wykonana w ramach projektu badawczego nr 4T12E 05729.

BIBLIOGRAFIA

[1] Ledwoń J., Golczyk M., Chłodnie kominowe i wentylatorowe. Arkady, Warszawa 1967

WYKORZYSTANE MATERIAŁY

[2] PN-91/B-02020: Ochrona cieplna budynków – Wymagania i obliczenia

[3] Projekt chłodni hiperboloidalnej o obciążeniu hydraulicznym 35000 m³/h. Przedsiębiorstwo Budowy Chłodni w Gliwicach, Gliwice 1979