

Zastosowanie skanera Faro Focus X330 w ocenie pionowości komina o wysokości 220 m

Use of the laser scanner Faro Focus X330 in the assessment of the verticality of the chimney with a height of 220 m



*Dr hab. inż. Tomasz Lipecki**



*Dr hab. inż. Wojciech Jaśkowski**



*Mgr inż. Wojciech Matwij**



*Mgr inż. Wojciech Skobliński***

Treść: Artykuł przedstawia analizę możliwości wykorzystania skanera Faro Focus X330 do badania pionowości obiektu wysmukłego o znacznej wysokości. Zazwyczaj panoramiczne skanery fazowe stosuje się do rejestrowania danych na znacznie krótszych odległościach. Przeprowadzone eksperymenty potwierdziły przydatność tego urządzenia do zinventaryzowania położenia osi komina o wysokości przekraczającej 200 m, co przedstawiono w analizie wielowariantowej. Badania te umożliwiły również zweryfikowanie pomiarów realizowanych klasycznie w odstępach rocznych. Zaprezentowane wyniki wskazują na spełnienie warunków dokładnościowych związanych z tego rodzaju badaniami. Zastosowanie przyrządu o tych parametrach jest dobrą alternatywą dla metod stosowanych powszechnie w pomiarach odchylenia obiektu od pionu. Dodatkową zaletą wykonanego skaningu jest możliwość stworzenia pełnego modelu wektorowego 3D i na jego podstawie wykorzystanie technik inżynierii odwrotnej.

Abstract: This paper presents an analysis of the possibilities of using the laser scanner Faro Focus X330 to study the verticality of a slender object of considerable height. Usually panoramic phase scanners are used to record data at much shorter distances. Conducted experiments confirmed the usefulness of this device to generate the position of the axis of the chimney with a height exceeding 200 m, as shown in the multivariate analysis. These studies also helped to verify the measurements carried out by conventional methods at yearly intervals. Presented results show that the precision of such tests is sufficient to the specified conditions. The use of instrument with this parameters is a good alternative to the methods commonly used in the measurement of the deviation of the vertical object. An additional advantage of scanning is the possibility to create a complete 3D vector model and on its basis - the use of reverse engineering techniques.

Słowa kluczowe:

skaning laserowy, monitoring, obiekty wysmukłe, inżynieria odwrotna, model 3D

Keywords:

laser scanning, monitoring, slender objects, reverse engineering, 3D model

*) AGH, Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków **) KGHM Polska Miedź S.A., OZG Polkowice - Sieroszowice

1. Wstęp

Kominy przemysłowe sklasyfikowane są jako obiekty budowlane wysmukłe, które ze względu na swoje proporcje należą do konstrukcji szczególnie narażonych na utratę stateczności (ITB, 2010) i występowanie naprężeń, powodujących ich deformacje w postaci odkształceń postaciowych. Najczęściej widoczną zmianą ich geometrii jest odchylenie osi komina od pionu, jak również wygięcie jego trzonu. Nie mniej istotne, choć występujące lokalnie są przemieszczenia elementów konstrukcyjnych względem siebie. Przyczynami tych odstępstw od stanu projektowego są względy budowlane (odstępstwa podczas budowy, niestabilność gruntu, zmiana technologii budowy itp.), obciążenie ciężarem własnym, obciążenia termiczne i obciążenie wiatrem, ale również występujące podczas eksploatacji obciążenia chemiczne (degeneracja konstrukcji pod wpływem agresywnego środowiska m.in. spalin) oraz zjawiska reologiczne (Oruba 2010, Puniach, 2014). Czynniki te mogą w sposób chwilowy oddziaływać na konstrukcję komina, jak również w sposób ciągły, co generować może deformacje krótko i długookresowe. Te pierwsze będą związane z odpowiedzią konstrukcji na czynniki dynamicznie wpływające na jej stan (wiatr, insolacja, wstrząsy górnicze), a pozostałe będą związane ze statyką budowli i jej stanem długotrwałym.

Jako konstrukcja budowlana, budowa kominów, ich eksploatacja i kontrola stanu jest osadzona w przepisach prawa, poczynając od: ustawy Prawo budowlane (Dz.U. 1994 poz.414), a normy szczegółowe są podane w normie polskiej: PN-B -03004:1988 Kominy murowane i żelbetowe oraz dostosowujących legislację polską do europejskiej: PN-EN 13084-1:2007 i 2:2007 Kominy wolno stojące- Część 1 i Część 2. Wskazuje się w nich na konieczność wykonywania badań diagnostycznych oraz prowadzenia oprócz Książki Obiektu Budowlanego tzw. Metryki Komina. Brak jest jednak szczegółowych informacji i wskazówek odnośnie szczegółów prowadzenia przeglądów technicznych. Pozostawiono to użytkownikowi, który powinien we własnych zakresie zapewnić bezpieczeństwo użytkowania obiektu.

Z tego też względu najczęściej wykonuje się przeglądy diagnostyczne w postaci wizji lokalnych specjalistów od konstrukcji budowli oraz dokonuje się pomiarów geodezyjnych kontrolujących wychylenie osi komina od pionu oraz zmianę położenia podstawy komina poprzez kontrolę wysokości reperów zamontowanych w przyziemiu konstrukcji. Najczęściej jednak badania geodezyjne ograniczają się do części zewnętrznej komina, choć wizje lokalne kominów wieloprzewodowych wykonywane są również po stronie wewnętrznej, w celu stwierdzenia spękań, złuszczeń płaszcza konstrukcji i deformacji elementów wyposażenia obiektu.

Pomiary geodezyjne są realizowane najczęściej w okresach rocznych lub rzadszych. Z uwagi na brak aktualnych regulacji, wyniki odnosi się najczęściej do instrukcji geodezyjnej resortu (Ministerstwo ... 1976a) i wytycznych wykonywania geodezyjnych pomiarów masywnych budowli wieżowych (Ministerstwo ... 1976b). Wychylenie statyczne osi trzonu wyznacza się najczęściej geodezyjnymi metodami tradycyjnymi w postaci:

- dwusiecznych kątów (otaczających stycznych),
- wcięć kątowych,
- rzutowania,
- biegunowej 3D,
- fotogrametrycznej.

Od kilkunastu lat można wykorzystać również metody pozwalające na określenie kinematyki drgań wierzchołka pod wpływem obciążeń krótkotrwałych (Jaśkowski i inni,

2002, Lipecki i inni, 2003) za pomocą pomiarów GPS (met. statyczna – diagnoza wychylenia i RTK- wyznaczenie drgań) oraz metody wideo detekcji plamki laserowej. Do metod tych dołączyć można obecnie interferometrię radarową za pomocą przyrządu IBIS, która umożliwi wyznaczenia charakterystyki drgań o niewielkich amplitudach (Kuras i inni 2010, Puniach 2014).

W artykule zaproponowano jeszcze jedną metodę diagnostyki geometrii konstrukcji komina, opartej o skaning laserowy. W zasadzie jest to odmiana metody biegunowej 3D, jednak gęstość zarejestrowanych punktów pomiarowych na obiekcie powoduje, że zamiast do metod dyskretnych (punktowych), można zaliczać tę metodę do diagnozy kompleksowej geometrii obiektu. Z uwagi na wysokość obiektów wysmukłych, stosowane do tej pory skanery były skanerami impulsowymi, co pozwalało na wykonywanie pomiarów do odległych obiektów (powyżej 150 m), jednak rozdzielczość pomiarowa nie gwarantowała jakości pozwalającej na szczegółowe analizy zmian konstrukcji. Autorzy zaproponowali wykorzystanie skanera fazowego, którego zasięg pomiarowy zwiększony jest do ponad 300 metrów. Jego charakterystykę opisano w rozdziale 2.

2. Charakterystyka dokładnościowa skanera laserowego Faro Focus X330

Do badań wykorzystano nowy produkt firmy FARO – skaner Faro Focus X330, którego charakterystykę (na podstawie materiałów firmowych) przedstawiono na poniższym rys. 1a, w porównaniu do wcześniejszego modelu Faro Focus 3D (rys. 1b). Istotnymi parametrami skanowania są: liczba pomierzonych punktów/sekundę – dochodząca do 1 miliona, dokładność pomiaru ± 2 mm, zasięg – do 307 m, a także kompresja szumów, która według producenta uległa znacznej poprawie.

Z uwagi na to, że wskaźniki te będą rzutowały na jakość pozyskanego materiału pomiarowego, przed przystąpieniem do wykonywania badań terenowych, dokonano ich sprawdzenia w warunkach laboratoryjnych. Wykonano pomiary powierzchni płaskiej i walcowej obydwoma skanerami (Focus 3D i X330), analizując odwzorowania powierzchni za pomocą uzyskanych punktów pomiarowych. Realizowano badania w odległości 12 m oraz 25 m, a następnie utworzono mapy hipsometryczne odchylek od powierzchni teoretycznej (płaszczyzny i walca). Poniżej zestawiono wyniki, przedstawione w formie tabeli rysunków (tab.1).

Daje się zauważyć zmniejszenie szumów pomiarowych w przypadku nowego modelu skanera (X330). Statystyki dołączone do poszczególnych map świadczą o poprawie od 30 do 50 % jakości dopasowania powierzchni pomiarowej do teoretycznej w stosunku do modelu poprzedniego (Focus 3D). Tym samym potwierdzono dane podawane przez producenta dotyczące poprawy jakości wykonywania skaningu laserowego skanerem fazowym Faro Focus X330.

3. Pomiary komina elektrociepłowni o wysokości 220 m w Polkowicach

Komin elektrociepłowni w Polkowicach jest typowym kominem jedнопrzewodowym (rys.2), zbudowanym z modułów żelbetowych, posadowionym w filarze ochronnym nad eksploatacją rud miedzi prowadzoną przez KGH SA O/ZG Polkowice-Sieroszowice. Z uwagi na swoją wysokość i lokalizację narażony jest on na wpływ czynników atmosferycznych, ale także związanych z eksploatacją górniczą. Z tego też względu co roku, w celu stwierdzenia aktualnego

a)

Dane techniczne Focus ^{3D} X 330				
Moduł dalmierza				
Przedział jednoznaczności:	122 tys. do 488 tys. punktów/sek: 614 m; 976 tys. punktów/sek: 307 m			
Zasięg Focus ^{3D} X 330:	0,6 m - 330 m wewnątrz lub na zewnątrz budynku i promieniu lasera padającym prostopadle na powierzchnię o współczynniku odbicia równym 90%			
Prędkość pomiaru: (punktów/sek):	122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000			
Błąd pomiaru odległości:	±2mm			
	@10m	@10m - kompresja szumów ³	@25m	@25m - kompresja szumów ³
@ odbicia 90%	0.3mm	0.5mm	0.3mm	0.15mm
@ odbicia 10%	0.4mm	0.2mm	0.5mm	0.25mm

b)

FARO Focus ^{3D}				
www.faro.com/focus				
Ranging Unit				
Unambiguity interval: 153.49m (503.58ft)				
Range Focus ^{3D} 120°: 0.6m - 120m indoor or outdoor with low ambient light and normal incidence to a 90% reflective surface				
Range Focus ^{3D} 20°: 0.6m - 20m at normal incidence on >10% matte reflective surface*				
Measurement speed: 122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000 points/sec				
Ranging error ² : ±2mm				
	@10m	@10m - noise compressed ⁴	@25m	@25m - noise compressed ⁴
@ 90% refl.	0.6mm	0.3mm	0.95mm	0.5mm
@ 10% refl.	1.2mm	0.6mm	2.20mm	1.1mm

Rys. 1 a) Charakterystyka techniczna skanera Faro X330; b) charakterystyka techniczna skanera Faro Focus 3D (źródło: www.faro.com)

Fig. 1. a) Technical characteristics of the scanner Faro X330; b) Technical characteristics of the scanner Faro Focus 3D (source: www.faro.com)

stanu osi trzonu komina, wykonywane są pomiary geodezyjne metodą dwusiecznych kątów. Wykonywane są również pomiary niwelacyjne, które umożliwiają ocenę stabilności fundamentu komina.

Pomiary klasyczne wskazały na powiększenie się wychylenia w ostatnich latach do wartości około 1150 mm. Jednocześnie widoczna jest zmiana profilu osi wskazująca na miejsce „przełamania”, co sygnalizuje konieczność wykonania kompleksowych, bardziej szczegółowych badań geometrii całej powierzchni płaszcza komina. Do tego nadaje się również zastosowanie metody fotogrametrycznej, jednak proces opracowania sprowadza całość zagadnienia do formy dyskretnej, opartej na analizie punktów charakterystycznych. Z tego też względu zastosowano skanowanie laserowe skanerem fazowym, którego możliwości pomiarowe wskazywały na możliwość zastosowania do takiego celu.

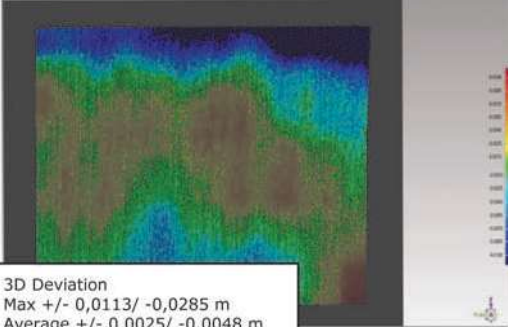
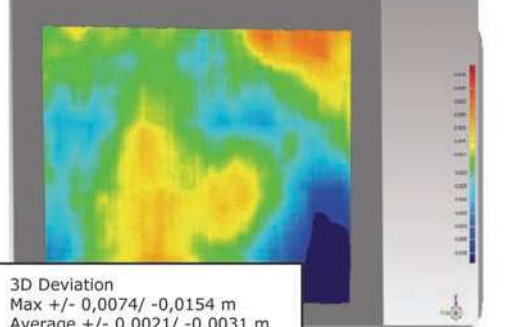
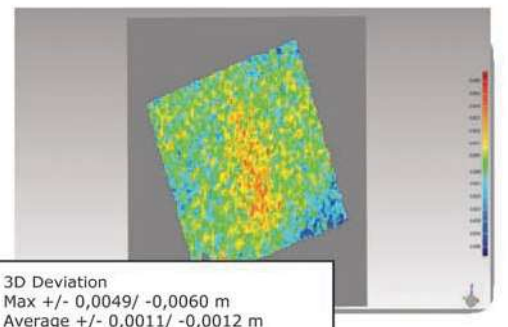
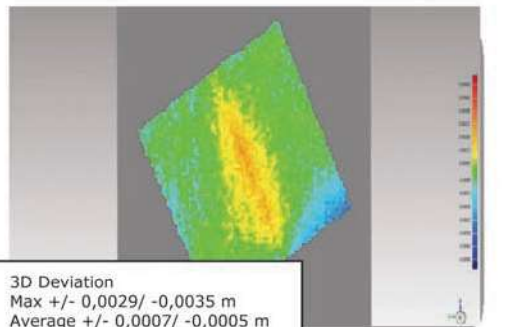
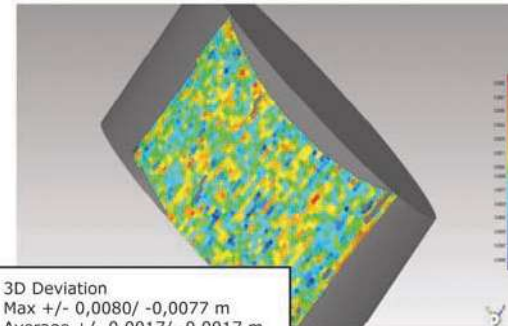
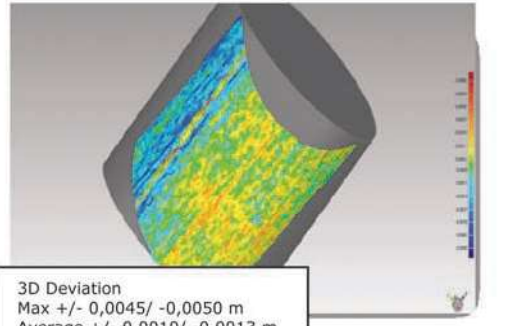
Pomiar wykonano z trzech stanowisk: dwóch ustawionych prostopadle do komina w pobliżu jego podstawy i jednego w większej odległości. Takie lokalizacje były związane z koniecznością pomiaru komina przy podstawie (bez zasłonięć obiektami towarzyszącymi) oraz w jego wyższych partiach. W efekcie pomiarów uzyskano model przestrzenny komina, przedstawiony na rysunku 3. Zaprezentowano go w postaci intensywności odbicia sygnału od powierzchni. Daje się zauważyć zmniejszenie ilości punktów zarejestrowanych przy wierzchołku. Jest to związane przede wszystkim z bardzo stromym kątem padania wiązki laserowej na powierzchnię płaszcza, a nie z brakiem zasięgu pomiarowego. Jednak i tak wykonane pomiary pozwoliły na zamodelowanie bryły faktycznego kształtu komina istniejącego na podstawie przekrojów pomiarowych oraz wykonanie analiz w oparciu o porównanie z modelem teoretycznym (utworzonego na

podstawie projektu). Umożliwiło to również wykonanie wyznaczenia kształtu przestrzennego osi komina (w rzucie na płaszczyznę poziomą i pionową) oraz wykonanie analiz powierzchniowych – tzw. map hipsometrycznych odchyłek powierzchni od teoretycznego modelu bryłowego. Wykonano również analizę i porównanie z pomiarami klasycznymi.

3.1. Wyznaczenie osi komina na podstawie pomiarów wykonanych skanerem laserowym

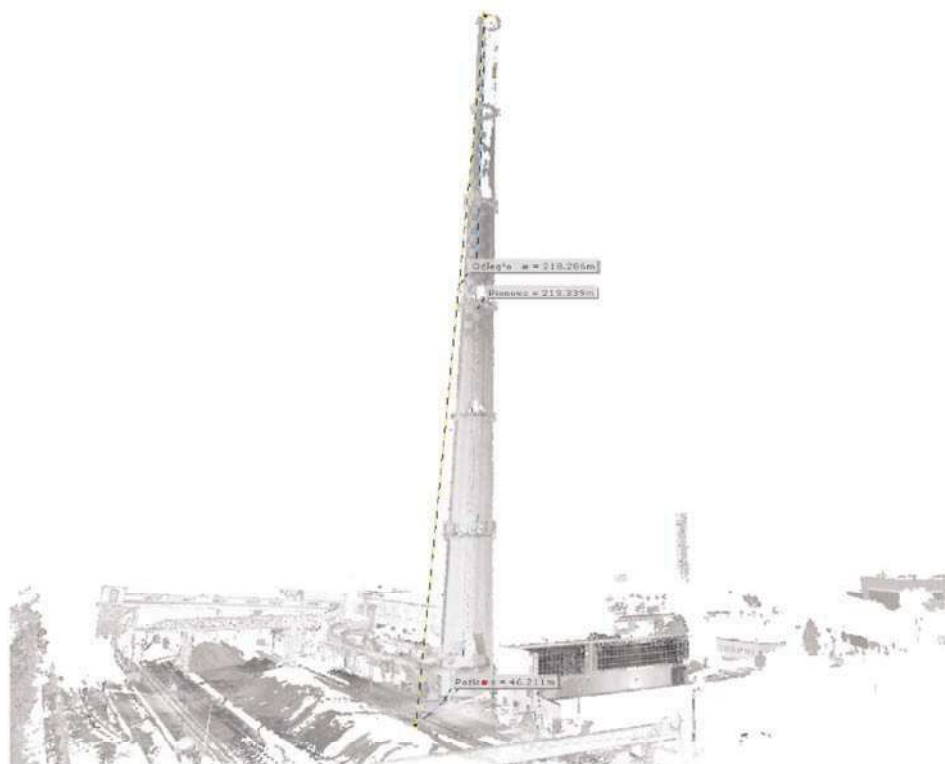
Najprostszym sposobem na ocenę stanu pionowości budowli wysmukłej jest wyznaczenie środków profili poprzecznych ustalonych w przyjętych interwałach na całej wysokości obiektu. Między innymi w ten sposób ocenia się pionowość komina przy pomocy klasycznej metody dwusiecznych kątów. W podobny sposób można zdefiniować profile, wycinając z chmury punktów odpowiednie jej fragmenty. Po wpasowaniu w nie okręgów, można wyznaczyć ich środki, uznawane za reprezentację osi komina na poszczególnych wysokościach. Połączenie tych środków umożliwia uzyskanie przebiegu przestrzennego wirtualnej osi budowli, która może być przedstawiona w postaci rzutów pionowych i poziomego. Możliwe jest również utworzenie na podstawie profili schematycznego modelu bryłowego faktycznego kształtu komina. Obydwie czynności przedstawiono na rysunku 4, pokazującym stwierdzoną wartość wychylenia (0,71m) na ostatnim analizowanym poziomie, tj. na wysokości 220 m. Model bryłowy przedstawiony również na tym rysunku posłużył do analizy zgodności tak utworzonego modelu z zarejestrowaną chmurą punktów. Analizę taką przedstawiono na rysunku 5. W celu potwierdzenia zgodności, wykonano niezależne analizy dla pokrywającego się fragmentu badanego obiektu

Tabela 1. Pomiary laboratoryjne skanerami fazowymi Focus 3D i Focus X330
Table 1. Laboratory measurements of 3D phase scanners Focus and Focus X330

Rodzaj badania	Faro Focus 3D	Faro Focus X330
Powierzchnia płaska Odległość 12 m	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0113/ -0,0285 m Average +/- 0,0025/ -0,0048 m Standard Deviation 0,0050 m RMS Estimate 0,0051 m</p>	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0074/ -0,0154 m Average +/- 0,0021/ -0,0031 m Standard Deviation 0,0037 m RMS Estimate 0,0038 m</p>
Powierzchnia płaska Odległość 25 m	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0049/ -0,0060 m Average +/- 0,0011/ -0,0012 m Standard Deviation 0,0014 m RMS Estimate 0,0014 m</p>	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0029/ -0,0035 m Average +/- 0,0007/ -0,0005 m Standard Deviation 0,0008 m RMS Estimate 0,0008 m</p>
Walec	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0080/ -0,0077 m Average +/- 0,0017/ -0,0017 m Standard Deviation 0,0022 m RMS Estimate 0,0022 m</p>	 <p>3D Deviation Max +/- 0,0045/ -0,0050 m Average +/- 0,0010/ -0,0013 m Standard Deviation 0,0014 m RMS Estimate 0,0014 m</p>



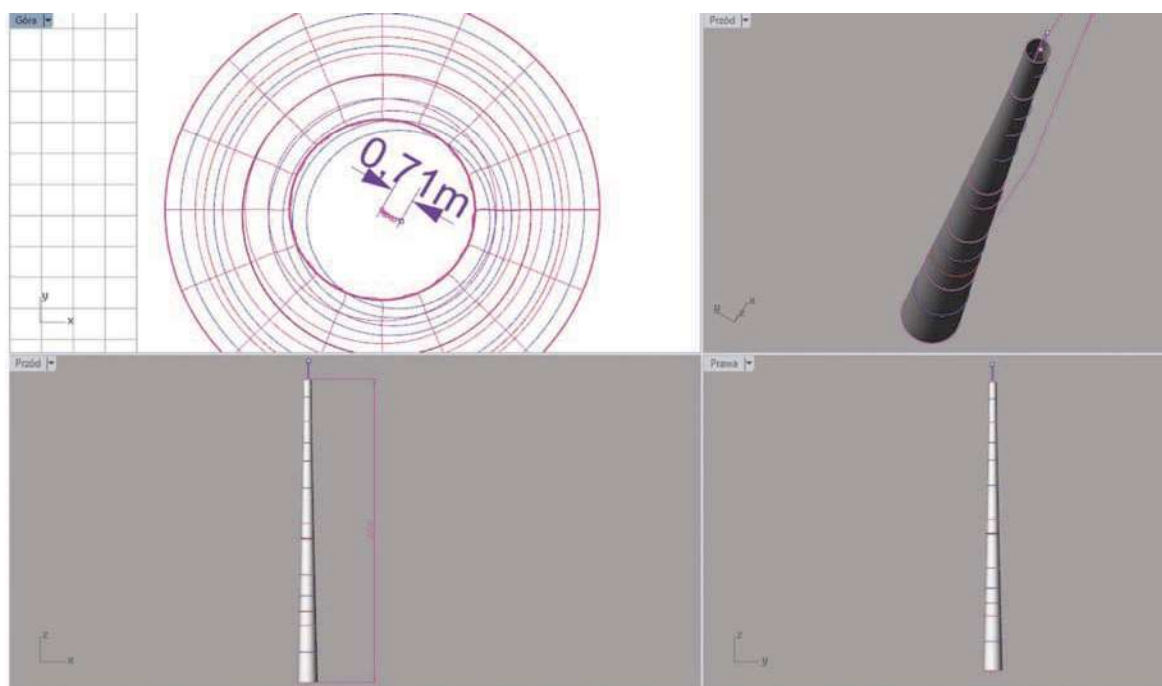
Rys. 2. Zarejestrowany przez skaner komin H=220 m w Polkowicach
Fig. 2. Chimney H = 220 m in Polkowice, registered by the laser scanner



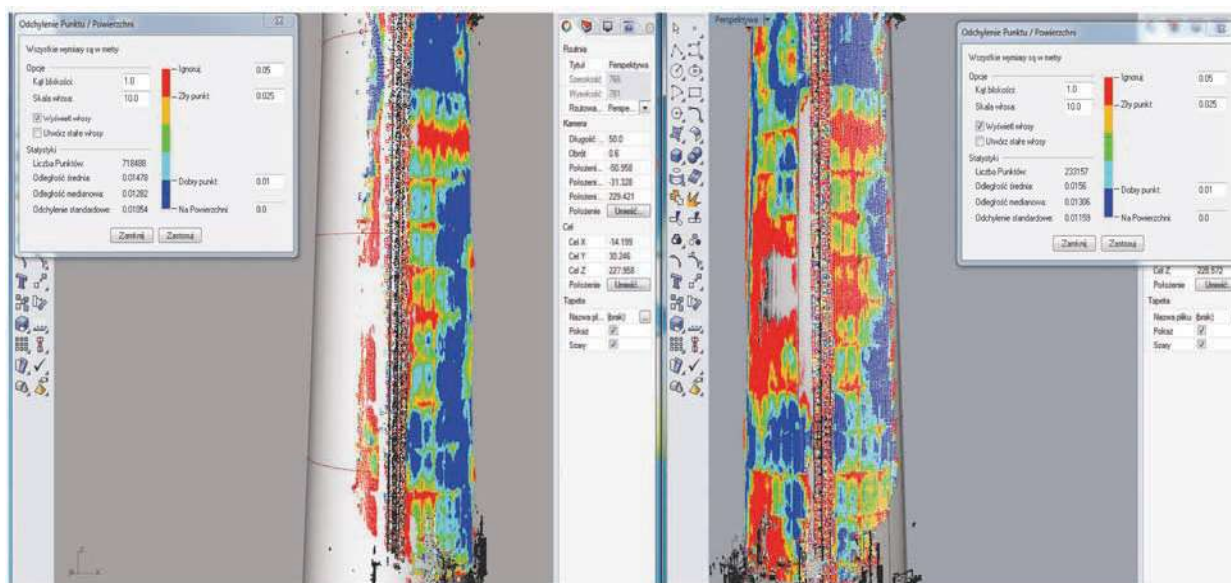
Rys. 3. Chmura punktów reprezentująca komin
Fig. 3. Point cloud representing the chimney

chmur punktów, uzyskanych ze stanowiska bliskiego (nr 1) oraz oddalonego (nr 3). Widoczna jest zgodność odchylek, co świadczy o jednorodności uzyskanej chmury punktów. Wartości odchylek w postaci zmiany koloru na mapie hipsometrycznej mają jeszcze jedną zaletę – wskazują na zmianę odległości punktów zarejestrowanych skanowaniem od modelu uproszczonego. Umożliwia to wizualizację szczegółów obiektu, które nie byłyby możliwe do zaobserwowania metodami dyskretnymi. Ewidentnie widoczne są miejsca łączenia

modułów wznoszonej konstrukcji i ich jakość spasowania. Zmiana koloru na tym samym poziomie może świadczyć o wpływie różnych czynników na aktualny stan powierzchni płaszcza komina. Odpowiednia analiza rozkładu hipsometrycznego umożliwia również stwierdzenie miejsc spękań i złuszczeń bądź deformacji (przede wszystkim odkształceń postaciowych), których skutkiem jest wygięcie i wychylenie trzonu konstrukcji.



Rys. 4. Wyznaczenie pionowości osi komina oraz utworzenie modelu brylowego w oparciu o profile poprzeczne
Fig. 4. Determination of the verticality of the axis of the chimney and development of a solid model based on cross-sections



Rys. 5. Porównanie zgodności zamodelowanej bryły z chmurą punktów (lewy – chmura ze stanowiska bliskiego 1, prawy – chmura ze stanowiska oddalonego nr 3)

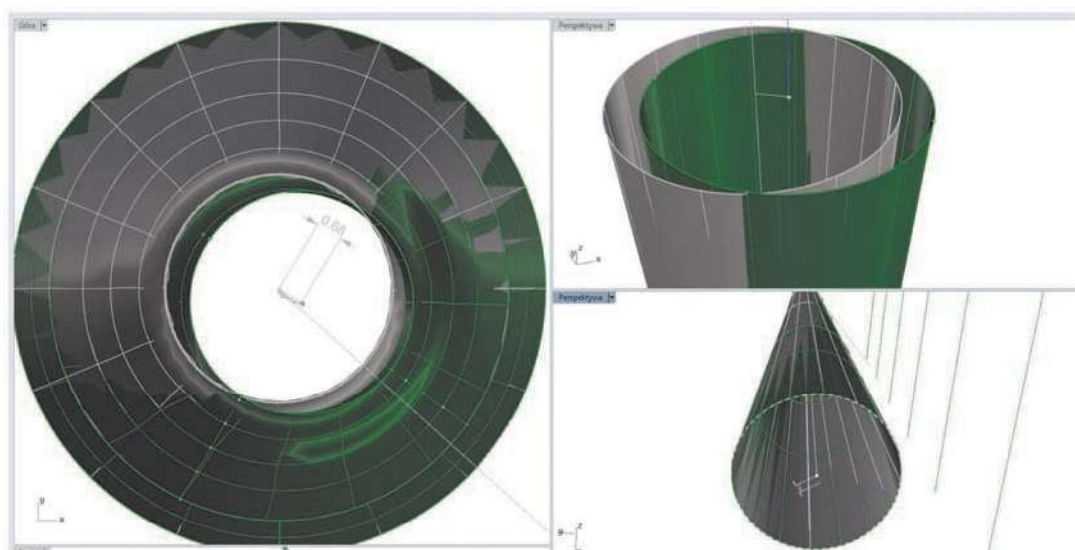
Fig. 5. Comparison of compliance solid model with a cloud of points (left - cloud from the position of close to 1, right - cloud away from the position No. 3)

W celu wykonania analiz opartych o model odchyłek w stosunku do modelu teoretycznego, stworzono model bryłowy na podstawie danych projektowych. Dzięki temu wykonane analizy powierzchniowe można odnieść do stanu idealnego, a wszelkie zmiany koloru map hipsometrycznych będą wskazywać na rozkład bezwzględny odchyłek w stosunku do modelu teoretycznego. Na rysunku 6 przedstawiono dwa modele bryłowe – pierwszy projektowy, a drugi uzyskany na podstawie skaningu laserowego. Widoczne jest ich wzajemne przecinanie się spowodowane odchyleniem osi komina od linii pionu. Zmiana koloru wskazuje również na kierunek odchylenia i wzrost jego wielkości, zgodnie z przyrostem wysokości.

W podobny sposób można wykonać analizę odchyłek pomiaru skaningowego względem bryły teoretycznej (projektowej), w postaci utworzenia mapy hipsometrycznej. Należy jednak pamiętać o tym, że źle dobrane parametry mogą doprowadzić do uzyskania nieprawidłowych wyników

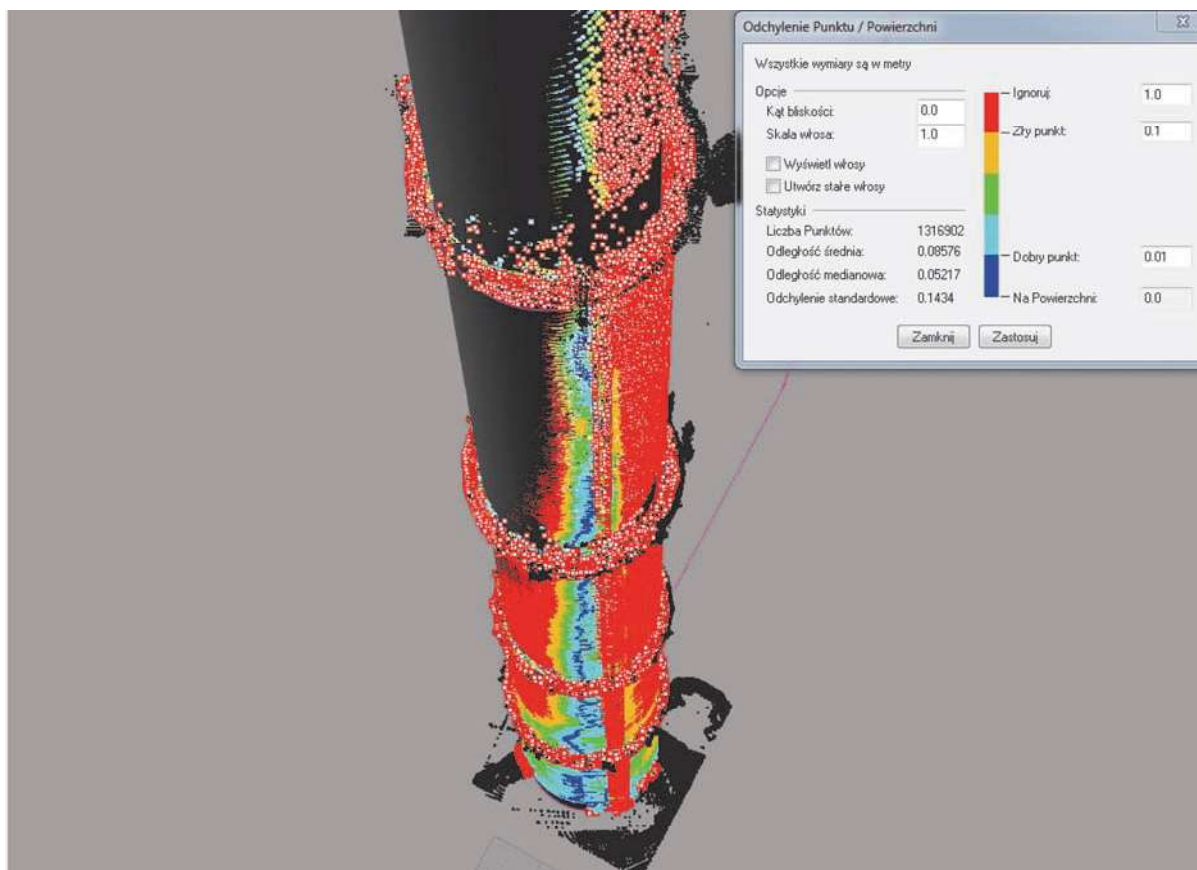
analizy. Przykład takiej błędnie wykonanej mapy odchyłek od rozkładu teoretycznego przedstawiono na rysunku 7. Kolory tam przedstawione mogą być interpretowane jako lokalizacje przemieszczeń (czerwony) lub świadczące o ich braku (niebieski). Jednak w tym przypadku kolor niebieski świadczy o przecięciu się porównywanych powierzchni (widoczne jest na rysunku 5), a nie o braku przemieszczeń.

Prawidłowo wykonana analiza musi uwzględniać to, że w zależności od algorytmów wykorzystywanych do stwierdzenia odległości punktu od powierzchni, uzyskuje się różne rozkłady hipsometryczne. Z tego względu należy wykazać się doświadczeniem w prowadzeniu takich analiz, dostosowanych w sposób indywidualny do konkretnego rodzaju obiektu. Przykład prawidłowego rozkładu hipsometrycznego opisującego wychylenie przedmiotowego komina przedstawiono na rysunku 8. Widoczny jest na nim logiczny rozkład odchyłek, zwiększających swój zakres zgodnie z kierunkiem wychyle-



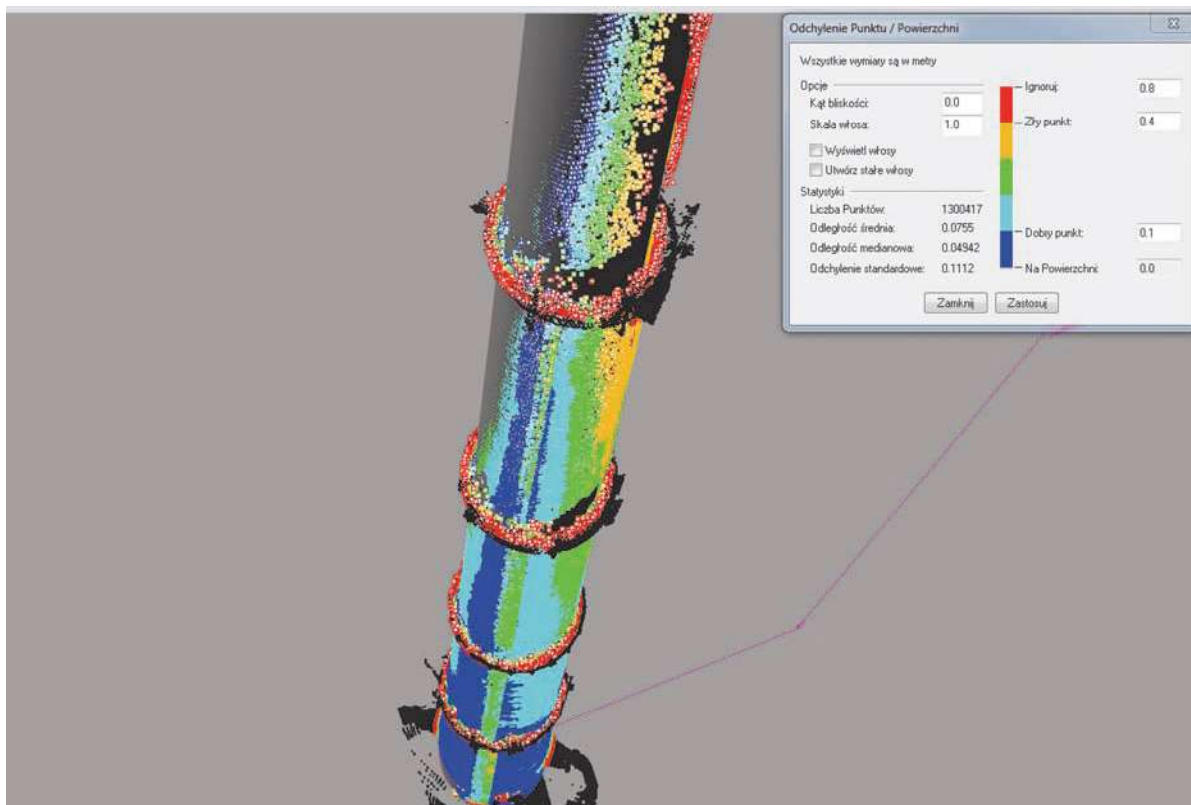
Rys. 6. Porównanie położenia modeli bryłowych komina – teoretycznego (szary) i rzeczywistego (zielony)

Fig. 6. Comparison of the position of solid models of the chimney – the theoretical (gray) and actual (green)



Rys. 7. Przykład błędnie wykonanej analizy powierzchniowej – kolor niebieski (zmiany poniżej 10 mm) nie świadczy o braku przemieszczeń

Fig. 7. Example of poor surface analysis – blue color (a change of less than 10 mm) does not indicate a lack of movements



Rys. 8. Powierzchniowy rozkład przemieszczeń płaszczka komina w stosunku do modelu teoretycznego (projektowego)

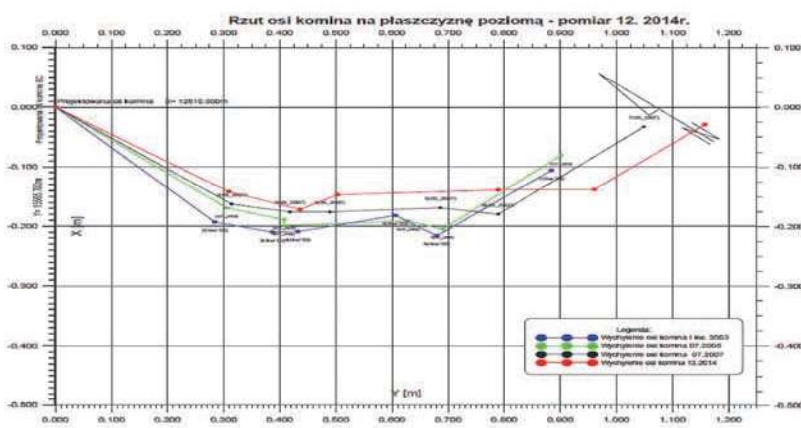
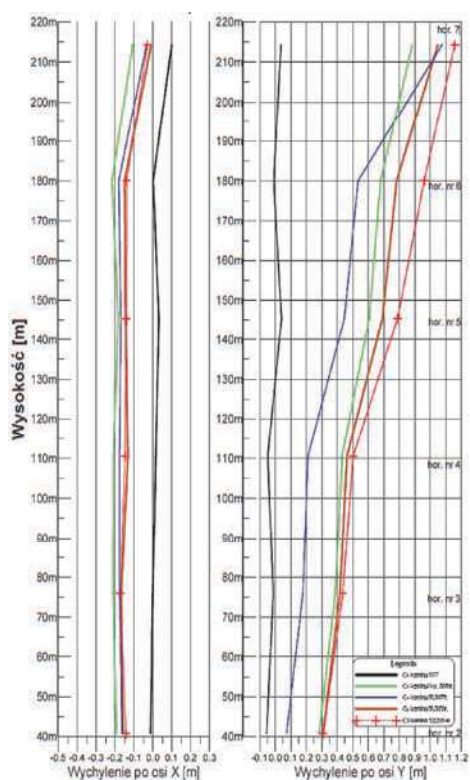
Fig. 8. The surface distribution of displacements of the chimney mantle in relation to the theoretical model (design)

nia osi komina. Przedstawia również miejsce największych deformacji na wysokości powyżej 100 m, które wskazują na prawdopodobną zmianę nachylenia osi trzonu. Przedstawiają również rozkład pola przemieszczeń otaczających miejsce największych zmian.

3.2. Analiza pionowości komina stwierdzona pomiarami klasycznymi

Pomiary komina elektrociepłowni w Polkowicach wykonywane metodą dwusiecznych kąta są realizowane od 1977 roku. Realizowane są one w cyklach jednorocznych i odnoszone do specjalnie zastabilizowanej osnowy wokół komina. W roku 1977 stwierdzono wychylenie wierzchołka o wartości 107 mm, a w 1990 roku wychylenie osiągnęło już wartość 520 mm. Utrzymało się ono do 2001 roku, po

czym zaczęło się ono zmieniać do wartości 890 mm w 2003 roku. Po uwzględnieniu zmiany współrzędnych osnowy, przemieszczonej pod wpływem okołofilarowej eksploatacji górniczej, wyznaczone wtedy wychylenie zostało zredukowane o 200 mm do wartości 684 mm. Kolejne cykle pomiarowe (czasem półroczne i realizowane po każdym wstrząsie górniczym) wskazywały na pogłębianie się stanu odchylenia o tej samej tendencji kierunku. Na rysunku 9 zaprezentowano zarejestrowane pomiarami klasycznymi stany odchylenia osi komina (lata 2003 – 2014), osiągające 1157 mm w roku 2014. Przedstawione są wartości wychyleń poszczególnych horyzontów pomiarowych względem osi lokalnego układu współrzędnych, w postaci profili pionowych wzdłuż osi X i Y oraz w rzucie sytuacyjnym. Widoczna jest zmiana nachylenia profilu osi komina na wysokościach 110 m i 180 m, szczególnie wzdłuż jednej z osi. Jest to prawdopodobnie związane z procesem wznoszenia i remontem, któremu poddawany był komin w latach poprzednich. Rzut sytuacyjny pozwala na orientację co do sposobu pogłębiania się procesu odchylenia osi od pionu. Jest on ewidentnie związany z otaczającą filar eksploatacją górniczą, co przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 9. Wychylenie osi komina zarejestrowane metodą dwusiecznych kąta w latach 2003 – 2014

Fig. 9. The inclination of the chimney axis registered by the angle bisectors in the years 2003-2014



Rys. 10. Położenie komina i kierunek jego wychylenia na tle otaczającej eksploatacji górniczej prowadzonej w latach 2003-2014

Fig. 10. Location of the chimney and the direction of its inclination against the surroundings of mining operations conducted in the years 2003-2014

Z uwagi na osiągnięcie przez komin wartości odchylenia przekraczających według pomiarów 1000 mm, zdecydowano się na wykonanie badań kontrolnych inną metodą, pozwalającą niezależnie wyznaczyć stan geometryczny obiektu (Lipecki, 2013), a jednocześnie umożliwiającą quasi-ciągłą ocenę stanu powierzchni płaszcza komina. Z tego też względu zastosowano do badań laserowy skaner fazowy Faro Focus X330.

4. Porównanie wyników pomiarów klasycznych i wykonanych skanowaniem laserowym

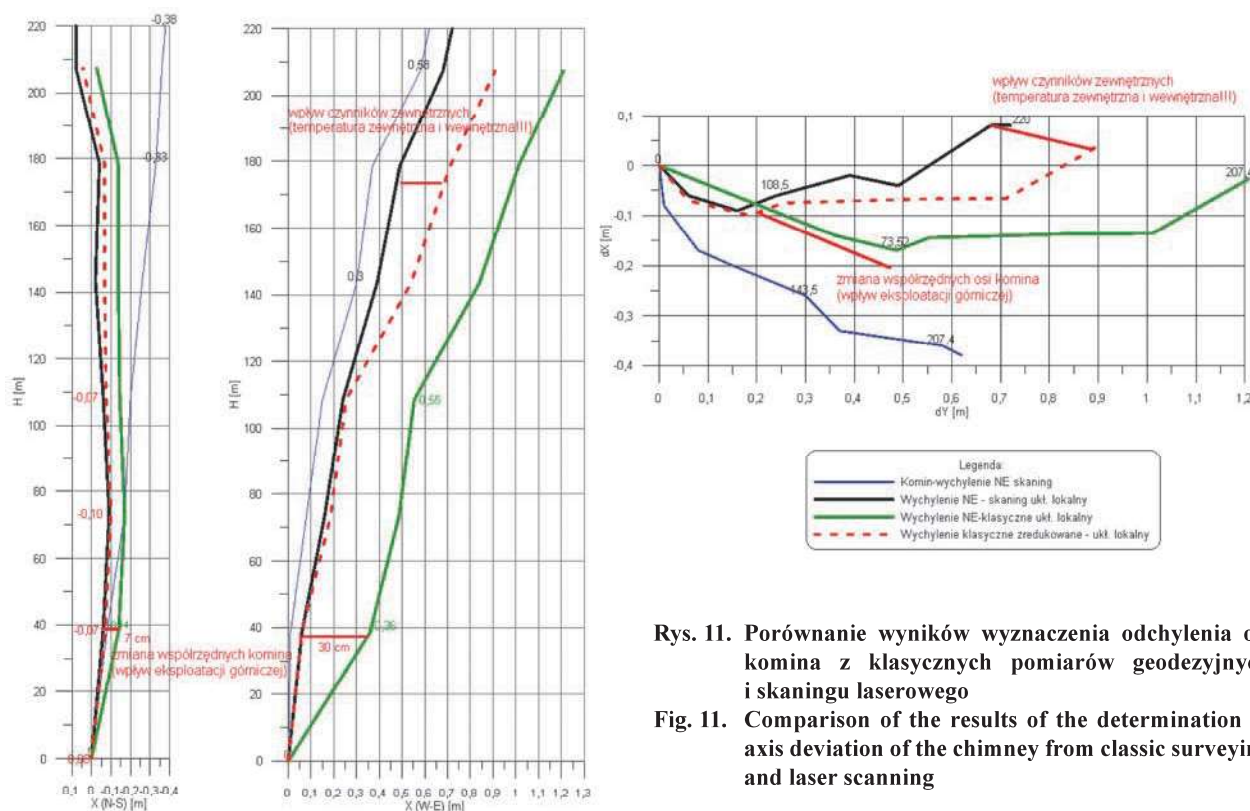
Wykonane analizy wskazały na rozbieżności pomiędzy uzyskanym wychyleniem na podstawie skaningu laserowego (710 mm) a stwierdzonym pomiarami geodezyjnymi (1150 mm).

W celu stwierdzenia przyczyn rozbieżności, nałożono uzyskane dwiema metodami wyniki stwierdzonego wychylenia osi na jeden wykres i sprowadzono do wspólnego układu współrzędnych, poprzez dokonanie transformacji układu skanera do układu wykorzystywanego w pomiarach geodezyjnych. Wyniki nałożenia widoczne są na rysunku 11. Przedstawiono na nim w postaci profili pionowych (strona lewa rysunku) oraz rzutu sytuacyjnego (strona prawa) wzajemne położenie rzutu osi komina na odpowiednim płaszczyźnie pionowej XZ, YZ i XY z pomiarów obydwoma metodami. Po zastosowaniu transformacji porównano kształt obydwu osi, wyznaczając jeden z elementów generujących rozbieżność wielkości wychylenia. Ma to związek ze zmianą współrzędnych osi komina o ok. 300 mm, z uwagi na przemieszczenie na niecce obniżeniowej, utworzonej pod wpływem eksploatacji górniczej. Zaprezentowano to przez wrysowanie czerwonego wektora w części przyziemnej komina. Po redukcji rzutu osi z pomiarów klasycznych o ten wektor, jego kształt reprezentowany jest przez linię czerwoną przerywaną. Daje się zauważyć bardzo dużą zgodność między pomiarami klasycznymi a wy-

konanymi skanerem do wysokości 110 m. Od tego horyzontu widoczna jest rozbieżność szczególnie w płaszczyźnie YZ (środkowy wykres). Jest to horyzont przełamania stwierdzony cyklicznymi pomiarami geodezyjnymi, a także przedstawiony na analizach pomiarów skaningowych, również w postaci rozkładu powierzchniowego. Wartość ta, wynosząca około 150 mm, nie jest związana z błędami pomiarowymi, gdyż o wzajemnej korelacji, a co za tym idzie dokładności obydwu metod (Puniach, 2014), świadczy zgodność profilu do tej wysokości. Jedynym wytłumaczeniem jest wpływ czynników zewnętrznych na płaszczyznę komina, generujący jego wygięcie w kierunku południowo-wschodnim (zgodnym z osią Y układu lokalnego współrzędnych) podczas pomiarów klasycznych lub w przeciwnym kierunku (N-W) podczas pomiarów skanerem laserowym (rys 11 – rzut sytuacyjny). Pomiary geodezyjne były wykonywane w grudniu 2014 roku przy temperaturze poniżej -5 stopni Celsjusza, natomiast pomiary skanerem laserowym – w czerwcu 2014 roku przy temperaturze dochodzącej do +30 stopni. Z tego też względu widoczna różnica jest prawdopodobnie związana z wygięciem trzonu pod wpływem insolacji (Żak, 1970) w kierunku północno-zachodnim, przez co zmniejszyła się wartość wychylenia zarejestrowanego podczas pomiarów skaningowych do wartości 710 mm.

5. Podsumowanie

Wykonane badania potwierdziły skuteczność zastosowanej metody fazowego skaningu laserowego w ocenie kształtu obiektu wysmukłego. Umożliwiła ona uzyskanie informacji o całej powierzchni płaszcza komina i wykonanie szeregu analiz tożsamyh z wykonanymi przy zastosowaniu metod klasycznych, jak również poszerzających ich spektrum poprzez wykorzystanie analiz powierzchniowych (Lipecki, 2013). Porównanie metod potwierdziło wzajemną zgodność wyników końcowych, co świadczy o prawidłowości przyjętych metodologii i uzyskanej dokładności badań. Uzyskane



Rys. 11. Porównanie wyników wyznaczenia odchylenia osi komina z klasycznych pomiarów geodezyjnych i skaningu laserowego

Fig. 11. Comparison of the results of the determination of axis deviation of the chimney from classic surveying and laser scanning

w początkowej fazie analizy rozbieżności można było odpowiednio poddać interpretacji, co doprowadziło do uzyskania zbieżnych wyników z obydwu metod. Przedstawiona w artykule interpretacja rozbieżności wychylenia wyższej partii konstrukcji jest wielce prawdopodobna, jednak należy ją uznać za hipotezę i weryfikować kolejnymi pomiarami. Wskazuje ona jednak na bardzo rozległe możliwości wykorzystania tego rodzaju skanera w diagnostyce stanu geometrycznego całej powierzchni kominu, pozwalając uchwycić poszczególne stany odkształceń związane z insolacją i deformacjami trwałymi (długookresowymi) całej powierzchni konstrukcji.

Przedstawione powyżej analizy pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków podsumowujących artykuł:

- Nowoczesne skanery fazowe pozwalają wykonać pomiary na odległościach nawet 300 m z rozdzielczością rzadko osiągalną skanerami impulsowymi.
- Skaniny laserowe w stosunku do metody klasycznej pozwala na poszerzenie zakresu analizy geometrii obiektów wysmukłych.
- Wykonane badania potwierdziły wychylenie osi kominu o około 0,7 m / 220 m oraz umożliwiły weryfikację kształtu osi kominu na poziomach pośrednich.
- Potwierdzono zmianę wielkości odchylenia na wysokości 110 m i 180 m, co w odniesieniu do prowadzonych cyklicznie pomiarów klasycznych od momentu wzniesienia budowli, świadczy o czynnikach związanych z budową i pracami remontowymi kominu.
- Analiza powierzchniowa w postaci rozkładów hipsometrycznych (chmur punktów i modelu 3D) pozwala wyznaczyć odchyłki od powierzchni teoretycznych oraz wyróżnić wzajemne położenia segmentów konstrukcji.
- Porównanie wyników skanowania z pomiarami klasycznymi umożliwiło wydzielenie wpływów eksploatacji górniczej w postaci przemieszczeń poziomych (około 0,33 m / 10 lat), jak również wpływu zmiennych warunków atmosferycznych panujących podczas skaningu i pomiarów kątowno-liniowych (ok. 0,15 m / 6 mies., przy różnicy temperatur 35 stopni Celsjusza).
- W korzystnych warunkach możliwe jest wykonanie analizy geometrii kominu na podstawie tylko 1 skanu (bez pozyskania pełnej chmury punktów) – dzięki możliwości zamodelowania bryły w oparciu o wpasowanie w uzyskane profile obwodowe.

Artykuł zrealizowano w ramach badań statutowych WGGiŚ AGH nr 11.11.150.195

Literatura

- Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414 - Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane.
- ITB Instytut Techniki Budowlanej 2010 - System kompleksowego zarządzania jakością w budownictwie. Bezprzewodowy monitoring obiektów budowlanych. Warszawa.
- JĄSKOWSKI W., JÓŻWIK M., KORBIEL T., LIPECKI T. 2002 - Wyniki ciągłej rejestracji wychyleń budynku w czasie wstrząsów górniczych; Problematyka inżynierska z zakresu ochrony terenów górniczych, Warsztaty 2002, PAN, Ustroń.
- KURAS P., KOCIERZ R., ORUBA R. 2010 - Pomiary dynamiczne kominów żelbetowych mikrofalowym radarem interferometrycznym. „Przeгляд Budowlany” nr 5, 64-67.
- LIPECKI T. 2013 - Kompleksowa ocena stanu geometrycznego obiektów i urządzeń szybowych z zastosowaniem skaningu laserowego, Wydawnictwa AGH, Seria Monografie 277, Kraków.
- LIPECKI T., PIEŁOK J. 2003 - Monitoring dynamicznych wychyleń budowli wieżowych technologią GPS. „Przeгляд Górniczy” nr 9.
- Ministerstwo Przemysłu Ciężkiego 1976a - Instrukcja geodezyjna resortu przemysłu ciężkiego. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa.
- Ministerstwo Przemysłu Ciężkiego 1976b - Wytyczne wykonywania geodezyjnych pomiarów masywnych budowli wieżowych. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa.
- ORUBA R. 2010 - Oddziaływanie środowiska przemysłowego i eksploatacji górniczej na bezpieczeństwo żelbetowych kominów przemysłowych, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- PN-B -03004:1988 Kominy murowane i żelbetowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 13084-1:2007 Kominy wolno stojące - Część 1.
- PN-EN 13084-2:2007 Kominy wolno stojące - Część 2.
- PUNIACH E. 2014 - Metodyka geodezyjnych badań odkształceń w diagnostyce wieloprzewodowych kominów przemysłowych, dysertacja AGH, Kraków.
- PUNIACH E., ORUBA W. 2014 - Zastosowanie skanerów laserowych w badaniach geometrii kominów przemysłowych. „Materiały Budowlane” nr 5, 30-31.
- ŻAK M. 1970 - Geodezyjna obsługa wznoszenia kominu żelbetowego w Thierbach w NRD. „Przeгляд Geodezyjny” nr 10.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016
Artykuł akceptowano do druku 5.04.2017

Zwiększajmy prenumeratę najstarszego – czołowego miesięcznika Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!

Zapraszamy do publikacji artykułów w wersji angielskojęzycznej