

BADANIA EKSPERYMENTALNE KRÓTKICH CIENKOŚCIENNYCH PROFILI STALOWYCH Z UŻYCIEM TECHNIK GEODEZYJNYCH

Katarzyna Jeleniewicz¹, Stanisław Raczyński¹,
Krzysztof Karsznia¹, Łukasz Uchański², Wojciech Gilewski³

¹Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

²Czerski Trade Polska Sp. z o.o.

³Politechnika Warszawska, Warszawa

Streszczenie. Konstrukcje cienkościenne cieszą się rosnącą popularnością ze względu na lekkość, łatwość montażu oraz prostą technologię wytwarzania. Są one jednak podatne na utratę stateczności (miejscowej lub ogólnej), dlatego często zdarza się, że o nośności elementu konstrukcyjnego decyduje wyboczenie lub stan powyboczeniowy. Ocena oraz pomiar deformacji jest więc kluczowym zadaniem, które należy wykonać, aby poprawnie zaprojektować tego typu konstrukcję. Celem, jaki postawili sobie autorzy pracy, było wykonanie wstępnych badań laboratoryjnych, na podstawie których ocenione zostały możliwości wykorzystania technik geodezyjnych przy pomiarze przemieszczeń poziomych kształtowników stalowych ulegających globalnej i miejscowej utracie stateczności pod wpływem osiowej siły ściskającej.

Słowa kluczowe: kształtowniki cienkościenne, gięcie na zimno, skaner laserowy, pręty ściskane

WSTĘP

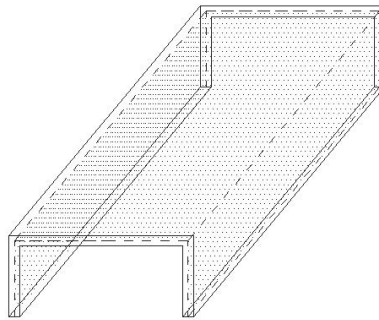
Od lat trzydziestych XX wieku konstrukcje cienkościenne cieszą się rosnącą popularnością (por. np. [Piechnik 2000, Yap 2008 i Hancock, Schafer i in. 2010]). W chwili obecnej, zakres ich stosowania obejmuje niemal wszystkie rodzaje nowoczesnych konstrukcji. Przewagę nad ustrojami o przekrojach zwartych daje im lekkość, którą rozumieć należy jako stosunek ciężaru własnego do nośności. Konstrukcje cienkościenne charak-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Katarzyna Jeleniewicz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii Budowlanej, ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, e-mail: katarzyna_jeleniewicz@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2016

teryzują się również łatwością montażu oraz stosunkowo nieskomplikowaną technologią wytwarzania.

Niniejszy artykuł dotyczy klasy konstrukcji cienkościennych, którą są prętowe kształtowniki gięte na zimno. Cechą charakterystyczną, a zarazem ograniczeniem odróżniającym te kształtowniki od konstrukcji prętowych pełnościennych jest ich podatność na utratę stateczności (globalnej oraz miejscowej). Wynika to przede wszystkim z dużej wartości stosunku wymiaru charakterystycznego do grubości ścianki. O prętach cienkościennych mówi się wówczas, gdy grubość ścianki jest co najmniej ośmiokrotnie mniejsza od najdłuższej drogi mierzonej po linii środkowej między dwoma skrajnymi punktami tej linii oraz długość tej drogi jest co najmniej ośmiokrotnie mniejsza od długości pręta [Piechnik 2000]. Przykład konstrukcji cienkościennej z zaznaczoną powierzchnią środkową (układem płaszczyzn) i linią środkową (układem odcinków) przedstawiono na rysunku 1.



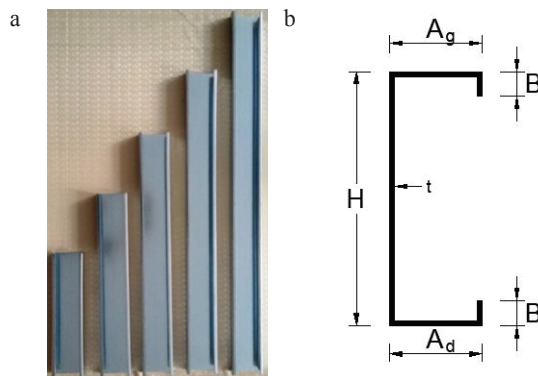
Rys. 1. Kształtownik z zaznaczoną linią środkową i płaszczyzną środkową
Fig. 1. Profile with selected mid-line and mid-surface

Aby zaprojektować konstrukcję cienkościenną w sposób poprawny, zagwarantować jej lekkość oraz wysoką nośność, niezbędne staje się rozpoznanie zachowania tej konstrukcji w pełnym zakresie obciążeń. Badania laboratoryjne przeprowadzone przy użyciu maszyny wytrzymałościowej pozwalają sporządzić m.in. wykresy zależności charakterystycznego przemieszczenia pionowego (przemieszczenia wzdłuż osi podłużnej) od siły obciążeniowej. Jednak w przypadku prętowych konstrukcji cienkościennych kwestią równie ważną jest wielkość przemieszczeń poziomych (w płaszczyźnie przekroju) oraz postać wyboczenia, ponieważ zazwyczaj wyboczenie lub stan powyboczeniowy decyduje o nośności elementu konstrukcyjnego.

Celem wstępnych badań laboratoryjnych przedstawionych w pracy była ocena możliwości wykorzystania technik geodezyjnych przy pomiarze przemieszczeń poziomych kształtowników stalowych ulegających globalnej i miejscowej utracie stateczności pod wpływem osiowej siły ściskającej. Dodatkowo przeprowadzono analizę wytrzymałościową badanych profili, rozumianą jako wpływ długości profilu na wielkość siły maksymalnej oraz na formę zniszczenia konstrukcji.

STANOWISKO BADAWCZE I ZAKRES WYKONANYCH PRAC

Przedmiotem badań opisanych w pracy były stalowe kształtowniki cienkościenne o przekroju ceowym, gięte na zimno. Badane profile wykonane były ze stali G350 [PN-EN 10346:2011], ocynkowane powłoką o sumarycznej masie $275 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Przekroje charakteryzowały się jednozągięciowym usztywnieniem brzegowym oraz brakiem bruzdy fałdowej. Wymiary przekroju poprzecznego zgodnie z rysunkiem 2, były następujące: $H = 100 \text{ mm}$, $A_g = A_d = 42 \text{ mm}$, $B = 10 \text{ mm}$, $t = 1,2 \text{ mm}$. Analizowane były profile o pięciu długościach – od 40 do 120 cm, ze zmiennością co 20 cm.



Rys. 2. Widok badanych profili: a – zestawienie, b – przekrój poprzeczny
 Fig. 2. View of analyzed profiles: a – general view, b – transverse cross-section

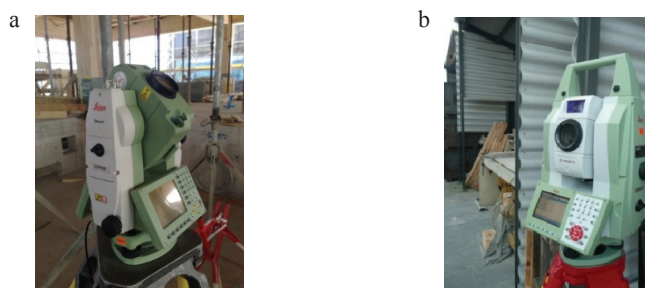
Stanowisko badawcze utworzone zostało w Centrum Wodnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, w Pracowni Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Budowlanych. Badania wykonywano za pomocą uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej stołowej firmy INSTRON, dającej możliwość badania próbek o maksymalnej długości 1,3 m, przy maksymalnym obciążeniu 100 kN. Zakres badań obejmował ściskanie osiowe kształtowników.

Do oceny deformacji badanych profili, po dokonaniu oceny dostępnych technologii pozycjonowania przestrzennego, wykorzystano impulsowy skaner laserowy Stonex X300 [Stonex X300 2016]. Wybór urządzenia podyktowany był takimi czynnikami, jak: oferowana dokładność pomiaru, zasięg operacyjny, szybkość działania oraz metoda emisji wiązki lasera. Należy również wspomnieć, iż wykorzystany model skanera jest rozwiązaniem nowym i wraz z komputerową technologią przetwarzania chmur punktów stanowi ciekawe rozwiązanie do oceny kształtu obiektów inżynierskich. Skaner 3D Stonex X300 skanuje do około 40 000 punktów na sekundę, zapewniając przy tym dokładność pomiaru punktu na poziomie poniżej 6 mm dla długości celowych do 50 m.

Rozważając zagadnienie badania odkształceń elementów cienkościennych w kontekście zmiany ich geometrii, w zależności od oddziałujących sił, pod uwagę brane były następujące metody: ocena fotogrametryczna, wymiarowanie za pomocą technologii dalmierzcych (tachimetr skanujący, precyzyjny dalmierz laserowy) oraz skaning laserowy 3D.

Ostatnio pomiary fotogrametryczne stanowią dynamicznie rozwijającą się technologię pozyskiwania danych. Spowodowane jest to postępem technologicznym w dziedzinie wysoko rozdzielczej fotografii cyfrowej, a także stale rosnącymi mocami obliczeniowymi współczesnych komputerów. Istniejący zasób wiedzy w tym zakresie oraz dostęp do nowoczesnego sprzętu fotogrametrycznego nie stanowi obecnie problemu. Pozyskiwanie obrazów możliwe jest bowiem przy użyciu dostępnych komercyjnie aparatów fotograficznych wyposażonych w wysoko rozdzielcze matryce oraz odpowiednie obiektywy zapewniające należyłą rozdzielczość uzyskiwanych zdjęć. W omawianym przypadku czynnikiem ograniczającym zastosowanie omawianej technologii była konieczność zapewnienia precyzyjnego pozycjonowania przestrzennego badanych elementów cienkościennych poddawanych odkształceniom. W takim przypadku należy w odpowiedni sposób zaaranżować układ odniesienia, np. za pomocą znaczników lub innych, łatwo identyfikowalnych elementów otoczenia, posiadających określoną wcześniej orientację przestrzenną. Istnieje również konieczność zapewnienia należytego zróżnicowanego rozmieszczenia punktów układu odniesienia. Autorzy stwierdzili, iż warunek ten w przypadku laboratorium będącego miejscem przeprowadzonych badań nie byłby należyście spełniony.

Efektywna ocena zmian geometrii badanych obiektów możliwa jest także dzięki zastosowaniu tachimetrów elektronicznych, a w szczególności zrobotyzowanych stacji pomiarowych wyposażonych w moduły skanujące [Karsznia 2014]. Sama technologia precyzyjnego pomiaru tachimetrycznego stosowana jest w świecie geodezji od kilkudziesięciu lat, aczkolwiek stale dokonujący się postęp w produkcji sprzętu pomiarowego otwiera nowe możliwości zastosowania oraz zmienia sposób realizacji pomiarów. Tachimetry skanujące umożliwiają pozyskiwanie precyzyjnych danych przestrzennych ($\pm 2-3$ mm) w interwałach sekundowych, a nawet dają możliwość ciągłego skanowania powierzchni z rozdzielczością do tysiąca punktów na sekundę [Leica 2006, 2013]. Kolejną zaletą wysoko rozdzielczych pomiarów tachimetrycznych jest możliwość pracy w dowolnie zdefiniowanych układach odniesienia, czyli dopasowania realizacji pomiaru do konkretnego obiektu. Podejście takie zapobiega powstawaniu zniekształceń odwzorowawczych oraz związanych z przeliczeniami między układami odniesienia. W celu wykonania pomiaru odległości tachimetr elektroniczny emituje wiązkę laserową, która po odbiciu od powierzchni celu powraca do układu odczytowego [Płatek 1991, Wanic 2007]. Następnie znajdujący się w urządzeniu moduł dalmierczy dokonuje precyzyjnego pomiaru czasu występującego między momentem emisji wiązki a jej powrotem. Dodatkowo ocenie poddawana jest modulacja wiązki laserowej. Technologia ta umożliwia ocenę pomiaru odległości na poziomie milimetrowym, a jedną z jej głównych zalet jest duża niezawodność i jednoznaczność realizowanych pomiarów. Dzięki wykorzystaniu techniki laserowej emitowana wiązka zachowuje dużą spójność, dzięki czemu możliwy jest pomiar konkretnego miejsca na powierzchni celu w zakresie rozmiaru plamki, czyli około 7×14 mm [Leica 2006]. Uwzględniając dodatkowo dużą dokładność pomiarów kąta poziomego i pionowego (nawet rzędu $\pm 0,5''$; zwykle od $\pm 1''$ do $5''$), można uzyskać przestrzenną reprezentację punktów położonych na skanowanej powierzchni z dokładnością kilkumilimetrową. Widok zrobotyzowanego tachimetru elektronicznego oraz tachimetrycznej stacji skanującej przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Widok zrobotyzowanych tachimetrów elektronicznych: a – zapewniający pomiar bezreflektorowy instrument Leica TCRP1201plus, b – skanująca stacja tachimetryczna Leica MS50

Fig. 3. View of robotic total-stations: a – reflectorless instrument Leica TCRP1201plus, b – scanning multi-station Leica MS50

Precyzyjne pomiary odległości możliwe są również dzięki zastosowaniu ręcznych dalmierzy laserowych (rys. 4). Ich zasada działania przebiega w sposób podobny, jak ma to miejsce w omówionych wcześniej tachimetrach elektronicznych. W tym przypadku jednak problem stanowią pomiary kątowe – nawet najbardziej zaawansowane technologicznie dalmierze ręczne wyposażone w moduły kątomierze nie zapewniają należytej dokładności pozycjonowania przestrzennego wymaganej w pomiarach odkształceń. Można, co prawda, w sposób bardzo dokładny ($\pm 1-2$ mm) określić odległość od czoła instrumentu do mierzonego obiektu lub obiekt taki zwymiarować, jednakże przedstawienie zmian geometrycznych w przestrzeni wymagałoby pomiaru prostopadłego do powierzchni, wykonywanego od stałej bazy odniesienia. W omawianym przypadku realizacji badań odkształceń profili cienkościennych metoda ta nie znalazła jednak zastosowania z racji ograniczeń dokładnościowych oraz braku możliwości zbudowania należytego stanowiska badawczego z użyciem dalmierza laserowego.



Rys. 4. Widok przykładowego ręcznego dalmierza laserowego Bosch DLE 70

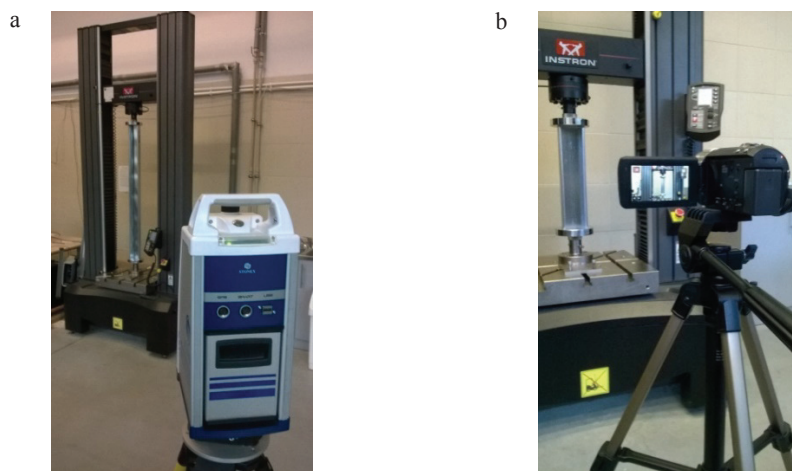
Fig. 4. View of an example handheld laser distance meter Bosch DLE 70

Rozwiązaniem łączącym zalety precyzyjnego pomiaru odległości, dużej dokładności kątowej oraz szybkości i efektywności prac geodezyjnych jest trójwymiarowy skanowanie laserowe. Sama zasada pomiarów odległości w przypadku skanerów laserowych zbliżona jest do technologii opisanej podczas omawiania precyzyjnej tachimetrii. Urządzenie

to wyposażone jest w głowicę skanującą, która emituje wiązkę laserową padającą na otaczające powierzchnie. Zakres pracy urządzenia można dowolnie defasonować – może wynosić on nawet 360° w płaszczyźnie poziomej, dostarczając do opracowania chmurę punktów reprezentującą całą dostępną przestrzeń. Prędkość obrotowa głowicy skanującej zapewnia rozdzielczość pomiaru nawet na poziomie miliona punktów na sekundę (w omawianym przypadku było to około 40 tysięcy punktów na sekundę). Zależy to głównie od rodzaju skanera (urządzenia impulsowe lub fazowe). Zasadą działania instrumentów impulsowych jest precyzyjny pomiar czasu między emisją a powrotem do układu odczytowego wyemitowanego impulsu wiązki laserowej, podczas gdy w przypadku skanerów fazowych – ocenie poddawana jest faza fali nośnej. Dobór odpowiedniej technologii zależy zatem od wymaganego czasu realizacji pomiaru, zasięgu oraz oczekiwanej dokładności. W przypadku krótkich odległości dla obiektów o szybko zmieniającej się geometrii (co miało miejsce w przypadku omawianego testu odkształceniowego elementów cienkościennych konstrukcji stalowej) rozwiązaniem bardziej optymalnym będzie użycie skanera impulsowego.

Ewidentną przewagą skaningu laserowego w stosunku do tachimetrii jest znacznie większa liczba pozyskiwanych punktów, jak również szybkość i wydajność pracy. Na tej podstawie, po przeprowadzeniu studiów wykonalności pomiarów przy użyciu wszystkich opisanych technologii pozycjonowania geodezyjnego, autorzy zdecydowali się na wykorzystanie właśnie skaningu laserowego 3D. O ostatecznym wyborze zdecydowały głównie takie czynniki, jak: dokładność, efektywność i wiarygodność pozyskiwania danych przestrzennych przy krótkich celowych, jak również aspekt ekonomiczny. Widok zorganizowanego stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.

Umieszczony na maszynie wytrzymałościowej badany element metalowy podlegał skaningowi laserowemu w trakcie jego ściskania oraz, dodatkowo, obserwacji wizualnej i rejestracji za pomocą cyfrowej kamery. Układ odniesienia dla skaningu sta-



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego: a – impulsowy skaner laserowy Stonex X300, b – kamera cyfrowa

Fig. 5. View of the test stand: a – impulse 3D laser scanner Stonex X300, b – digital camera

nowiły jednoznaczne, precyzyjnie określone elementy maszyny wytrzymałościowej. Proces odkształceń powstających na skutek oddziaływania siły zgniatającej rejestrowany był również w systemie komputerowym za pomocą oprogramowania BlueHill® i prezentowany wizualnie w formie wykresów (rys. 6).



Rys. 6. Widok monitora prezentującego wykres obciążeń badanego elementu zachodzących podczas prób

Fig. 6. Screen view presenting the load graph of a structural element under tests

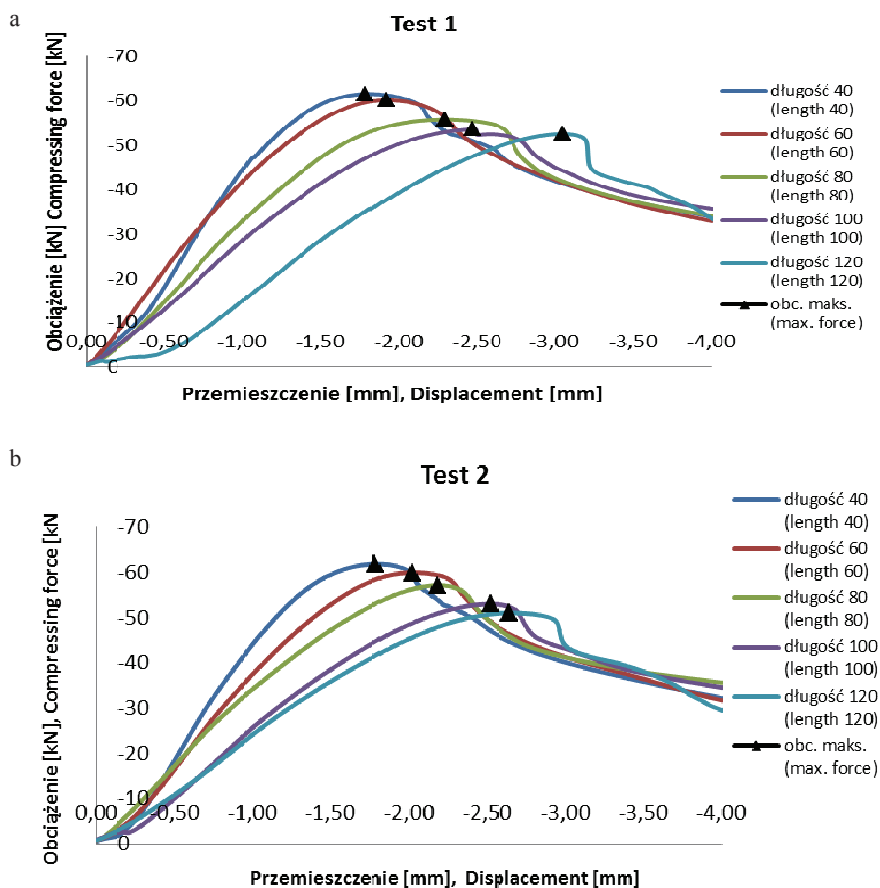
W celu zachowania systematyki badawczej przyjęto bazę dwóch powtarzalnych stanowisk skanera (punkty zamarkowane na posadzce laboratorium, ograniczniki na nogi statywu skanera), dzięki czemu wyeliminowano błędy zmiany kąta padania wiązki lasera, a także wynikające ze zmian odległości do testowanego obiektu. Pozyskane w wyniku skanowania chmury punktów poddane zostały odpowiedniej filtracji, a poszczególne skany wyrażono we wspólnym układzie współrzędnych, umożliwiając tym samym ich dalsze analizy porównawcze.

WYNIKI BADAŃ I ANALIZY

Pomiar siły ściskającej

Ocenię poddano deformację par próbek elementów cienkościennych o stosownych długościach. Próbki zostały ustawione na talerzach maszyny wytrzymałościowej w sposób zapewniający osiowe przekazywanie siły, a następnie były obciążane siłą ściskającą przykładaną z ustaloną wartością prędkości. Wynikiem analizy było określenie zależności przemieszczenia pionowego od wartości przyłożonej siły. Badania wykonywano w dwóch seriach – odpowiednio dla każdej długości testowanego kształtownika. Wynik w formie wykresów zaprezentowano na rysunku 7.

Zarówno w pierwszym, jak i w drugim teście można było zauważyć następującą zależność: im większa długość badanego kształtownika, tym mniejsza wartość maksymalnej siły ściskającej. Przeprowadzone pomiary pozwoliły oszacować ilościowo poziom



Rys. 7. Wykresy zależności przemieszczenia pionowego od wartości siły ściskającej: a – test pierwszy, b – test drugi

Fig. 7. Chart presenting the dependences of vertical displacements on value of compressing forces: a – the first test, b – the second test

spadku siły. Wartość przemieszczenia pionowego (przy sile maksymalnej) zwiększa się wraz z długością próbki – dla 40 cm jest to około 1,7 mm, a dla próbki długości 120 cm – 2,8 mm.

Otrzymane wykresy odpowiadają dostępnym w literaturze przykładom proporcji przemieszczenia do obciążenia dla profili cienkościennych [Kotełko 2014]. Na ich podstawie można wyróżnić cztery fazy:

- fazę dokrytyczną (obejmująca stan liniowy),
- fazę zakrytyczną (stan nieliniowy),
- fazę trzecią, inicjującą pierwsze uplastycznienie w jednej ze ścian konstrukcji,
- fazę zniszczenia.

Na przedstawionym wykresie trzy pierwsze fazy znajdują się po lewej stronie obciążenia maksymalnego, natomiast faza czwarta usytuowana jest po stronie prawej.

Z wykresu odczytać też można maksymalną wartość siły obciążeniowej. Przy dalszym przykładaniu obciążenia można było obserwować zmianę kształtu przekroju poprzecznego kształtownika oraz różne postacie wybożenia, co zostało przedstawione na rysunku 8. Badania wykonywane były do około 40% spadku siły maksymalnej.



Rys. 8. Widok badanych kształtowników po wykonaniu testów wytrzymałościowych
Fig. 8. View of the examined elements after strength tests

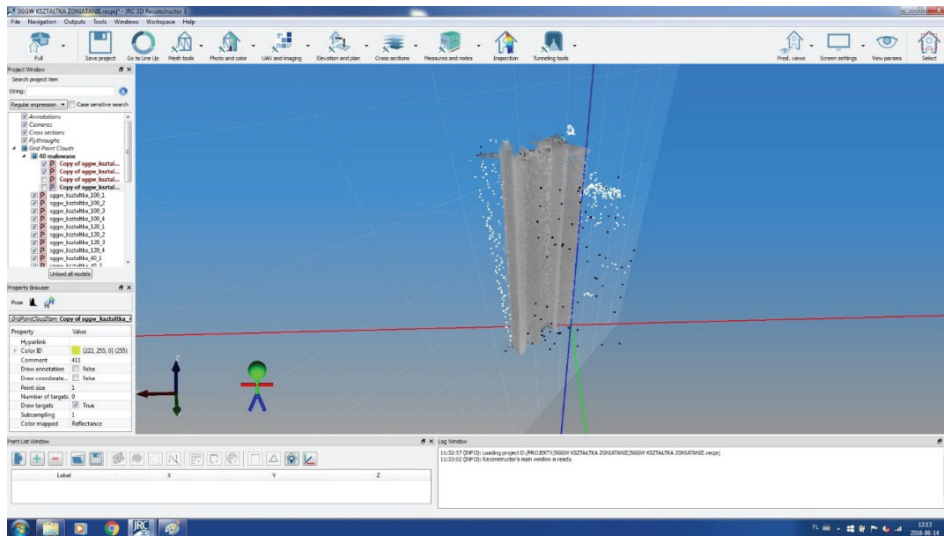
Na rysunku 8 przedstawiono kształtowniki w ostatniej fazie obciążenia z widocznym wybożeniem miejscowym oraz globalnym. W trakcie badania początkowo wybożeniu ulegał śródnik (obserwowano falowanie na tylnej ściance), a następnie odchyleniu wewnętrznemu lub zewnętrznemu ulegały półki. Podczas badania widoczne były interakcje pomiędzy wybożeniem śródnika i półek. Utrata stateczności następowała w sposób łagodny. Największy gwałtowny spadek wytrzymałości można zaobserwować w przypadku najdłuższej próbki (rys. 7), co jest związane z największą podatnością tej próbki na wybożenie globalne.

Skaning laserowy

Testem wstępnym przed przystąpieniem do skanowania była analiza zachowania się wiązki lasera na dwóch różnych powierzchniach – dla kształtownika stalowego niepokrytego żadną powłoką (o wysokiej odbiciowości) oraz zmatowionego poprzez nałożony szary lakier. Wykonanie dwóch skanów z tego samego miejsca oraz pomiar odległości, a następnie porównanie otrzymanych wyników potwierdziło brak różnic w charakterystyce odbiciowości wpływającej na gęstość punktów oraz ich rozmieszczenie na powierzchni badanego materiału stalowego.

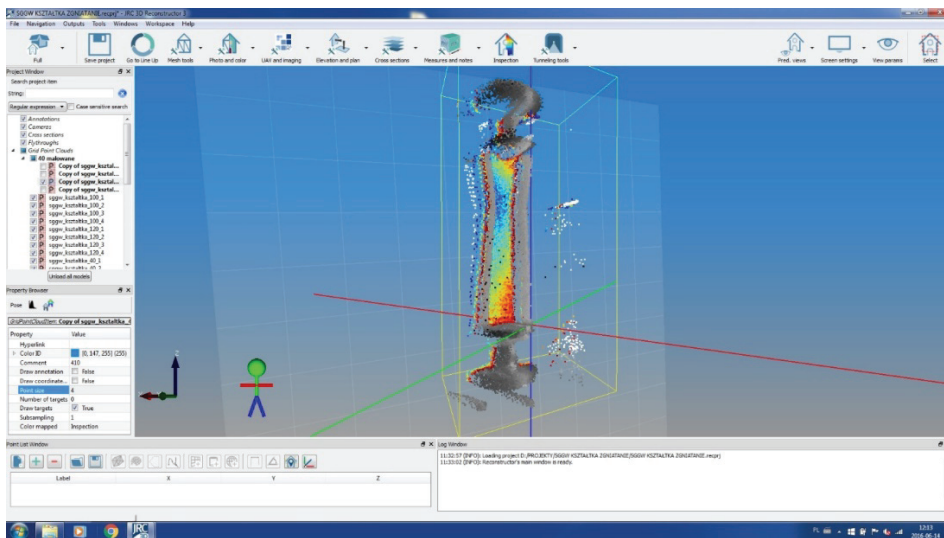
Geometryczna ocena powstałych odkształceń przeprowadzona została w wyniku opracowania danych ze skaningu laserowego w specjalistycznym programie JRC 3D Reconstructor®. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono widok zamodelowanej chmury punktów kształtownika długości 40 cm, pozyskanej w trakcie skaningu.

Po wykonaniu pomiaru skanującego badany element cienkościenny reprezentowany jest przez chmury punktów (*point clouds*) przedstawiających stan przed zgnieceniem oraz po zgnieceniu na maszynie wytrzymałościowej. Na podstawie ich porównania przy



Rys. 9. Widok ekranu głównego programu JRC 3D Reconstructor® obrazującego chmurę punktów badanego elementu

Fig. 9. Main screen view of the program JRC 3D Reconstructor®

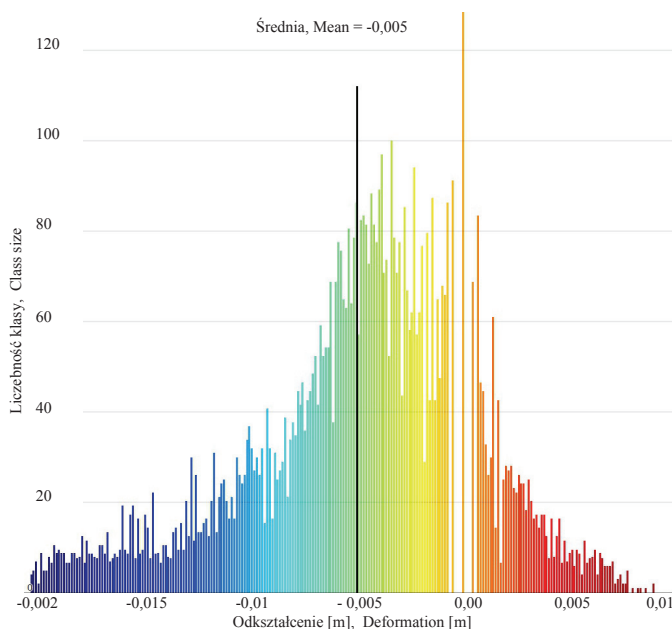


Rys. 10. Widok ekranu głównego programu JRC 3D Reconstructor® obrazującego wartości odkształceń badanego elementu

Fig. 10. Main screen view of the program JRC 3D Reconstructor® presenting deformation values of a test element

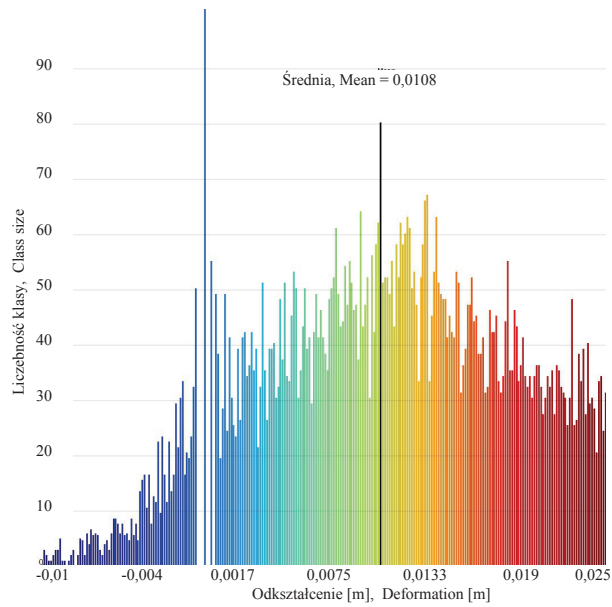
użyciu wspomnianego oprogramowania wyznaczono zmiany współrzędnych przestrzennych. Poziom zarejestrowanych odkształceń oceniono, biorąc pod uwagę konkretny widok kształtownika, tzn. widok od strony lewej i prawej, oraz prostopadłą od kierunku skanowania.

Oprócz graficznej i numerycznej reprezentacji poziomu odkształceń wynikiem oceny wyznaczonych zmian geometrycznych są także raporty oraz histogramy (rys. 11–13), określające udział poszczególnych klas (zakresów) zaobserwowanych zmian na tle całkowitej reprezentacji przestrzennej badanego elementu. Zastosowanie histogramów miało na celu przedstawienie poszczególnych klas wartości odkształceń, co – oprócz obrazu zaprezentowanego na rysunku 10 – charakteryzuje poziom ich występowania dla badanych elementów.

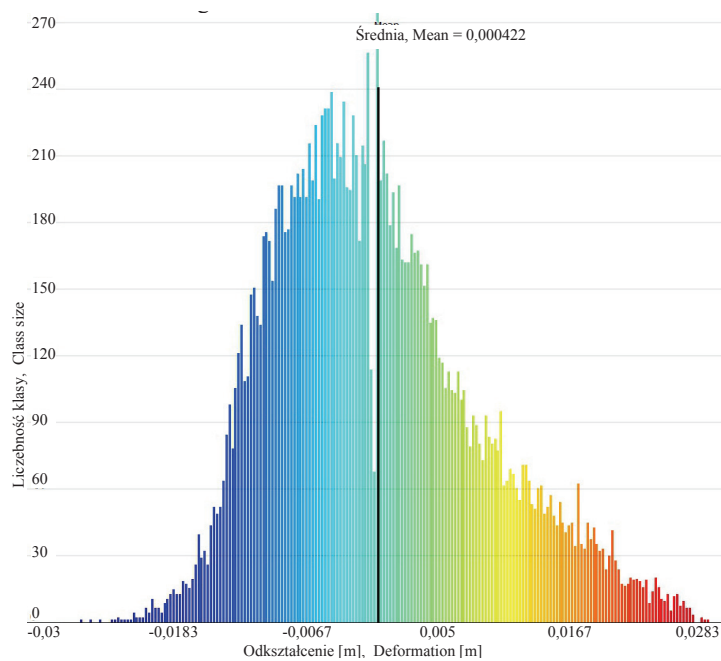


Rys. 11. Histogram klas odkształceń badanego elementu konstrukcji – widok od strony prawej
Fig. 11. Deformation histogram of a tested structural element on the right side

Dzięki przedstawionym ocenom poziomu odkształceń badanych elementów cienkościennych zginiatanych na maszynie wytrzymałościowej możliwe jest dalsze prowadzenie pełnych analiz przestrzennych zmian zachodzących w badanej konstrukcji. Prace takie stanowią kolejny etap kompleksowych badań charakterystyki omawianych elementów konstrukcyjnych.



Rys. 12. Histogram odształceń badanego elementu konstrukcji od strony lewej
 Fig. 12. Deformation histogram of a tested structural element on the left side



Rys. 13. Histogram odształceń badanego elementu konstrukcji prostopadle do kierunku pomiaru
 Fig. 13. Deformation histogram of a tested structural element perpendicular to the line-of-sight

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Badania stanu konstrukcji budowlanej realizowane są w wielu aspektach. Ocenie podlegają przede wszystkim cechy mierzalne – wyniki pomiarów wielkości geometrycznych lub fizykalnych. Ocenia się także wizualnie (bez pomiarów) charakter deformacji i proces zniszczenia. Kluczowy staje się zatem dobór odpowiedniej techniki pomiarowej, wspomaganej specjalistyczną oceną wizualną zachodzących zmian. Podejście takie jest niezwykle ważne w konstruowaniu odpowiednich systemów monitoringu deformacji oraz stanu konstrukcji budowlanych, tzw. SHM (*Structural Health Monitoring*). W omawianym przypadku ocenie podlegała również sama technologia geoinformacyjna, za pomocą której oceniano poziom deformacji badanych elementów konstrukcyjnych. Dzięki odpowiedniemu doborowi metod pomiaru użytkownicy otrzymują bowiem wiarygodne informacje o zachowaniu się całego obiektu oraz o występujących stanach zagrożenia. Umożliwia to prowadzenie pełnego monitoringu obiektu inżynierskiego oraz zasilanie bazy danych, co z kolei pozwala na budowanie eksperckich systemów zarządzania ryzykiem.

Wyniki analizy ściskanych kształtowników cienkościennych, przeprowadzonej na podstawie pomiarów fizykalnych (maszyna wytrzymałościowa) oraz geometrycznych (skaniny laserowe 3D), potwierdzają dużą użyteczność zaproponowanej metody oraz wskazują na konieczność prowadzenia dalszych badań nad oceną zachowania się testowanych elementów w ujęciu kompleksowym. Osiągnięto cel główny, polegający na odpowiedniej weryfikacji poziomu deformacji konstrukcji oraz na doborze metody ich wyznaczania. Na podstawie przeprowadzonych prób stwierdzić można, iż wykorzystanie impulsowego skanera laserowego 3D do oceny poziomu deformacji badanych elementów daje dokładne i wiarygodne rezultaty. W związku z powyższym uznać można, iż metoda skaningu laserowego w pełni nadaje się do efektywnej oceny stanu konstrukcji złożonej ze stalowych elementów cienkościennych.

PIŚMIENNICTWO

- Karsznia, K. (2014). Współczesna technologia skanowania laserowego 3D w monitorowaniu przemieszczeń i deformacji obiektów mostowych. *Mosty*, 1, 24–27.
- Kotelko, M. (2014). *Nośność i mechanizmy zniszczenia konstrukcji cienkościennych*. Wydawnictwo WNT, Warszawa.
- Leica TPS1200+ (2006). *Precyzyjny i wydajny tachimetr elektroniczny*, LeicaGeosystems AG. Heerbrugg, Szwajcaria.
- Leica Nova MS 50 Datasheet (2013). Heerbrugg, Szwajcaria.
- Piechnik, S. (2000). *Pręty cienkościenne – otwarte*. Politechnika Krakowska, Kraków.
- Płatek, A. (1991). *Geodezyjne dalmierze elektromagnetyczne i tachimetry elektroniczne. Część pierwsza*. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych im. Eugeniusza Romera. Warszawa – Wrocław.
- PN-EN 10346:2011. *Wyroby płaskie stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły. Warunki techniczne dostawy*.
- Schafer, B.W., Li, Z., Moen, C.D. (2010). Computational modeling of cold-formed steel. *Thin-Walled Structures*, 48, 752–762.

- Stonex X300 (2016). <http://www.stonexpositioning.com/index.php/en/products/laser-scanners/x300-detail>.
- Wanic, A. (2007). Instrumentoznawstwo geodezyjne i elementy technik pomiarowych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn.
- Yap, D.C.Y., Hancock, G.J. (2008). Experimental Study of Complex High Strength Cold Formed Cross Shaped Steel Section. ASCE Journal of Structural Engineering, 134, 1322–1333.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF SHORT THIN-WALLED STEEL STRUCTURES BY USING GEODETIC TECHNIQUES

Abstract. Thin-walled structures have considerably become popular due to their light weight, easy installation and simple manufacturing technology. However, they are liable to the loss of stability (which occurs locally or generally) and therefore, it often happens that the bearing capacity of a structural component is determined by buckling or by the after-buckling state. Regarding that, both the proper assessment of deformation as well as its measurement have become a crucial task that needs to be performed before the designing phase of such structures. The main goal the authors intended to achieve was to perform some preliminary laboratory tests that would be helpful to assess the possibility of using geodetic positioning techniques for measuring horizontal displacements of steel sections undergoing global and local stability loss under axial compressive force.

Key words: thin-walled structures, cold folding, 3D laser scanner, compressed rods

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.11.2016

Cytowanie: Jeleniewicz, K., Raczyński, S., Karsznia, K., Uchański, Ł., Gilewski, W. (2016). Badania eksperymentalne krótkich cienkościennych profili stalowych z użyciem technik geodezyjnych. Acta Sci. Pol. Architectura, 15 (4), 17–30.