

dr inż. Robert Cybulski¹⁾
dr hab. inż. Artur Piekarczyk^{2)*}

Skanowanie optyczne stalowych elementów konstrukcyjnych

Optical scanning of constructional steel elements

DOI: 10.15199/33.2019.02.02

Streszczenie. W artykule opisano budowę przestrzennego modelu teoretycznego podwójnie giętych cienkościennych paneli stalowych, które są stosowane do wznoszenia samonośnych łukowych hal i konstrukcji dachowych. Model ten zbudowano na podstawie przestrzennego skanowania optycznego, który odzwierciedla geometrię elementu. Celem działania jest opracowanie wiarygodnego modelu opisującego złożoną geometrię panelu. Model ten został wykorzystany do numerycznej analizy stateczności lokalnej podwójnie giętego panelu cienkościennego.

Słowa kluczowe: panele podwójnie gięte; profile zimnogięte; analizy numeryczne; skanowanie 3D złożonej geometrii.

Abstract. The article briefly describes the construction of theoretical model of the doubly corrugated thin-walled steel panels, which are used as a solution for self-supporting arch buildings and roof structures. This model was built based on the 3D optical scanning, which reflects the geometry of the component. The aim is to create a reliable theoretical model with panel's complex geometry. This model has been used for numerical analysis of local stability of the doubly corrugated thin-walled steel panels.

Keywords: double corrugated panels; cold-formed profiles; numerical analysis; 3D optical scanning of complex geometry.

Jednym z tanich i szybkich w realizacji rozwiązań budowlanych jest ABM (ang. *Automatic Building Machine*), czyli przenośna fabryka do prefabrykacji i budowy łukowych hal stalowych z wykorzystaniem paneli samonośnych. Technologia ta pochodzi z USA i należy do MIC Industries Inc. Była ona powszechnie używana przez amerykańską armię do budowy tymczasowych budynków, a obecnie stała się popularna w budownictwie cywilnym. Maszyna służąca do prefabrykacji paneli jest umieszczona na przyczepie („fabryka na kółkach”) i może być łatwo transportowana na każdą budowę. Po przywiezieniu na teren budowy urządzenia i kręgów blachy płaskiej, proces prefabrykacji może być wykonany przez niewielką grupę przeszkolonych montażystów. Docelowa geometria powstała wskutek głównego gięcia podłużnego i drugorzędowego gięcia poprzecznego i dlatego używana jest nazwa podwójnie gięte panele cienkościenne [2]. Ze względu na pofałdowaną powierzchnię paneli ABM 120 czy 240, niemożliwe jest wyznaczenie parametrów efektywnych przekroju poprzecznego wg krajowych oraz europejskich norm, a parametry te są niezbęd-

ne przy projektowaniu konstrukcji z elementów cienkościennych. Natomiast budowa modeli geometrycznych paneli z pofałdowaną powierzchnią, na podstawie tradycyjnych pomiarów (np. suwmiarką), wnosi ryzyko pominięcia istotnych parametrów geometrii m.in. z uwagi na ocenę stateczności lokalnej i imperfekcji geometrycznych. W celu odzwierciedlenia prawdziwej geometrii omawianych paneli zastosowano metodę przestrzennego skanowania optycznego. Modele te mogą być wyeksportowane do programów Metody Elementów Skończonych (MES), a następnie użyte w analizach numerycznych.

Skanowanie optyczne paneli ABM 120

W celu przeskanowania podwójnie giętego panelu cienkościennego wycięto próbkę o długości 0,6 m z łuku o promieniu 10 m (fotografia 1). Do skanowania paneli wykorzystano skaner 3D



Fot. 1. Próbkę o długości 0,6 m
Photo 1. 0,6 m long sample

(COMET L3D 2M). Jest to precyzyjne urządzenie do tzw. pomiarów bezdotykowych. W celu zapewnienia dokładności pomiarowych konieczna jest kalibracja systemu, którą należy przeprowadzić: każdorazowo po przewiezieniu systemu; po zmianie pola widzenia; w przypadku znacznej zmiany temperatury w miejscu pracy lub okresowo raz w tygodniu. W celu przeprowadzenia kalibracji musimy zadbać o poprawne ustawienie systemu skanującego. Na początku tego procesu, oprogramowanie skanera wyświetla informacje, jakiej karty oraz jakiej tablicy kalibracyjnej należy użyć do kalibracji danej objętości pomiarowej. W przypadku skanera COMET L3D 2M można wybrać jedno z trzech pól widzenia: 100; 200 lub 400. W celu zeskanowania profili cienkościennych wykorzystano pole widzenia 400, które ma następujące parametry:

- objętość pomiarową – 400 x 300 x 250 mm³;
- rozdzielczość punktową (odległość między skanowanymi punktami) – 250 μm;
- weryfikowalną dokładność skanowania – 25 μm.

Następnie przechodzimy do właściwego okna kalibracyjnego (fotografia 2). Największą powierzchnię zajmuje widok z kamery. W prawym górnym rogu mamy informację, w jaki sposób należy ustawić tablicę kalibracyjną względem karty (Pozycja P1, Rotacja A). W pierw-

¹⁾ Politechnika Śląska; Wydział Budownictwa

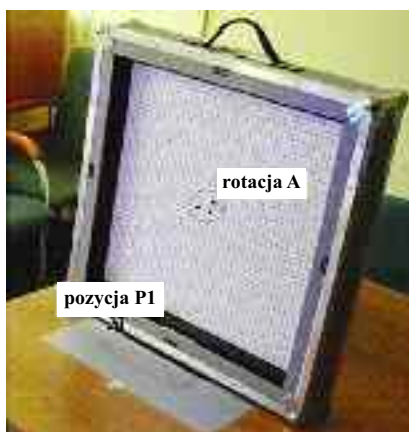
²⁾ Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu

* Adres do korespondencji:
a.piekarczyk@itb.pl



Fot. 2. Okno kalibracji systemu COMET
Photo 2. Calibration window in COMET system

szym kroku kalibracji ustawiamy skaner prostopadle do tablicy kalibracyjnej. Odpowiednią odległość pomagają nam znaleźć znaczniki laserowe, które w pierwszej pozycji powinny ułożyć się w linii pionowej. Ustawioną tablicę kalibracyjną przedstawiono na fotografii 3.

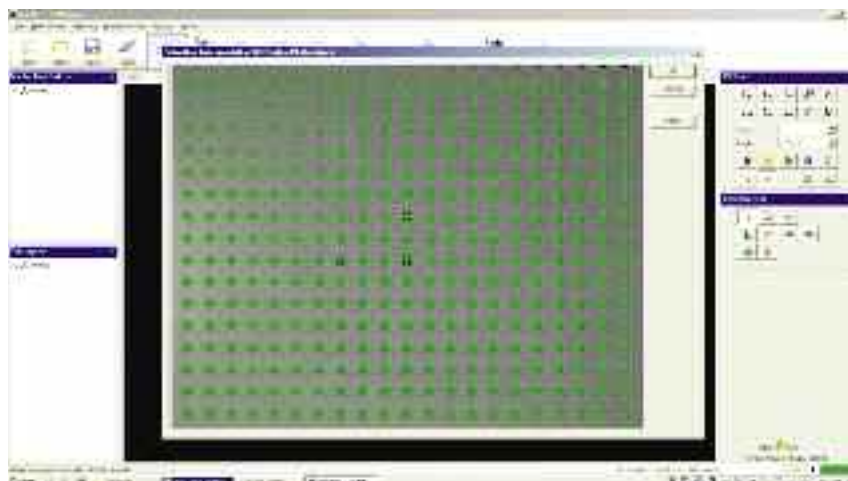


Fot. 3. Prawidłowe ustawienie tablicy w pierwszym kroku kalibracji
Photo 3. The correct setting of the table in the first calibration step

Po ustawieniu systemu można przystąpić do kalibracji. Od tego momentu, aż do zakończenia kalibracji nie zmieniamy pozycji skanera i karty, operujemy tylko tablicą kalibracyjną. Podczas kalibracji należy zadbać o poprawne ustawienie czasu ekspozycji oraz odpowiednie doświetlenie sceny pomiarowej. Ustawienie tych parametrów jest niezwykle proste. Należy jedynie zadbać, aby na ekranie nie pojawiały się czerwone punkty informujące o powstawaniu refleksów. Jeżeli po wykonaniu pomiaru wszystkie punkty zostały zare-

jestrowane i podświetlone są na zielono (fotografia 4), można zatwierdzić dany krok.

Po zaakceptowaniu ostatniego kroku program automatycznie przeprowadza obliczenia, których efektem jest raport w postaci wykresu słupkowego (fotografia 5). W przypadku, gdy wszystkie wartości są oznaczone kolorem zielonym, a wysokość słupków nie przekra-



Fot. 4. Widok prawidłowo zarejestrowanych punktów pomiarowych
Photo 4. View of correctly registered measuring points

cza poziomu 70%, kalibracja jest zakończona powodzeniem.

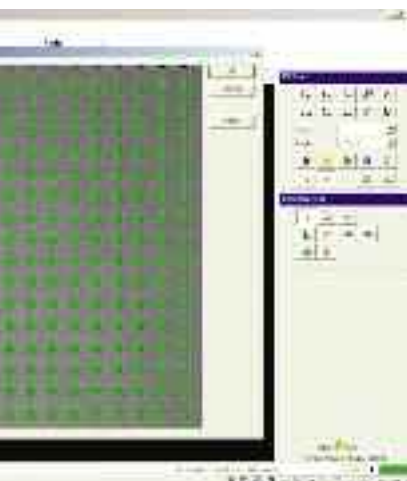
Po wykonaniu kalibracji można przystąpić do skanowania profili, podczas którego badany obiekt jest oświetlany błękitnym światłem. Na powierzchni przedmiotu projektowane są zestawy linii o określonej strukturze. Kamera CCD (j. ang. *Charge-Coupled Device*) obserwuje zakrzywienie projektowanych linii i na podstawie ich



Fot. 5. Okno podsumowujące prawidłowo wykonaną kalibrację

Photo 5. The window summarizing the correctly performed calibration

zniekształcenia oblicza dokładną pozycję w przestrzeni 3D każdego punktu widzianego przez kamerę. W wyniku skanowania otrzymuje się chmurę punktów odzwierciedlającą kształt skanowanego przedmiotu. Otrzymana chmura punktów zostaje przekształcona w siatkę trójkątów (fotografia 6). Elementy trójkątne pozwalają lepiej odtworzyć kształt skanowanego elementu niż elementy czworokątne. Ponadto podział na elementy trójkątne jest odwracalny i łatwiejszy do zautomatyzowania.



Fot. 6. Siatka trójkątów
Photo 6. Triangle mesh

Do utworzenia modelu powierzchniowego NURBS (ang. *Non-Uniform Rational B-Spline*), a następnie konwersji do modelu CAD (ang. *Computer Aided Design*) wykorzystano program do inżynierii odwrotnej. Dzięki opcji tworzenia „powierzchni swobodnych” można dopasować powierzchnię do utworzonej poprzednio siatki trójkątów, a następnie utworzyć kopię rzeczywistego panelu przy jednoczesnej minimalizacji prawdopodobieństwa wystąpienia błędów podczas symulacji w oprogramowaniu do analiz MES. Gotowy model powierzchniowy panelu cienkościennego przedstawiono na fotografii 7. Odzwierciedla on skomplikowaną geometrię połamanych powierzchni stalowego panelu. Uzyskany model został

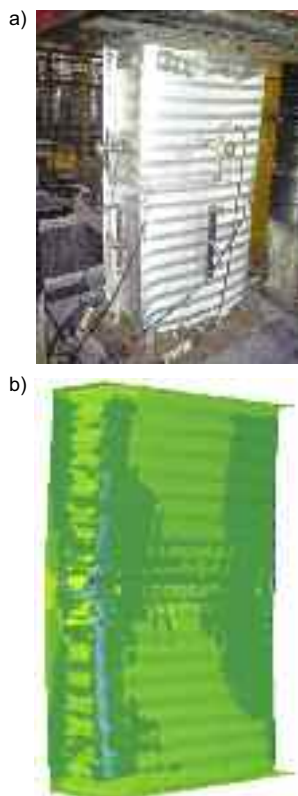


Fot. 7. Model powierzchniowy panelu cienkościennego

Photo 7. Surface model of a thin-walled panel

wyeksportowany do programu MES w celu numerycznej analizy stateczności lokalnej. Deformacje otrzymane podczas badań laboratoryjnych oraz z badań numerycznych (z geometrią otrzymaną ze skanowania 3D) są identyczne. Porównanie tych deformacji w przypadku wybranej próbki przedstawiono na fotografii 8. Szczegółowe wyniki badań i obliczeń z wykorzystaniem skanowanego modelu przedstawiono w publikacji [1].

Skanowanie stosowane było również do otrzymania geometrii modelu systemu K-span odmiany ABM 240. W tym przypadku zastosowano metodę laserowej triangulacji z dokładnością pomiaru $\pm 0,1$ mm, wykorzystując ręczny skaner Nikon Model Maker MMCx, zamontowany na siedmioosiowym ramieniu przegubowym Nikon MCAX. Wynik skanowania obiektu przedstawiono na rysunku 1. Uzyskana geometria jest re-



Fot. 8. Porównanie deformacji, które uzyskano podczas badań laboratoryjnych (a) i numerycznych (b)

Photo 8. Comparison of deformations obtained in laboratory tests (a) and numerical (b)



Rys. 1. Wynik skanowania obiektu
Fig. 1. Scanning result

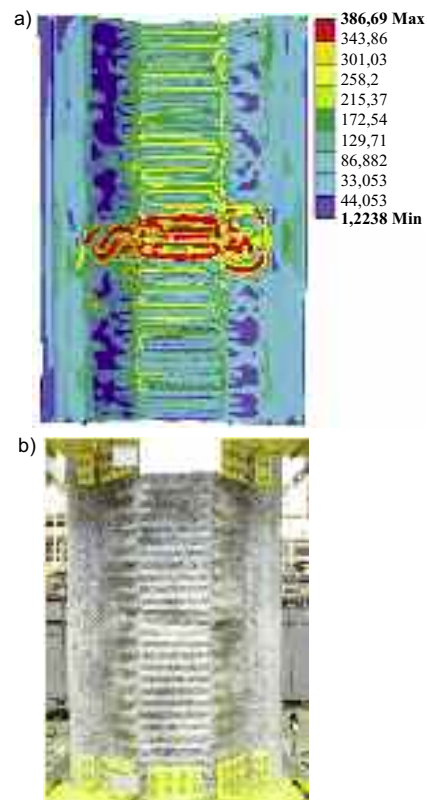
prezentowana jako chmura punktów, która została importowana do modelu programu obliczeniowego MES.

Przykładowy wynik obliczeń modelu skanowanego (naprężenia zredukowane) oraz wynik badania odporności na ściskanie przedstawiono na rysunku 2.

Szczegółowe wyniki badań i obliczeń z wykorzystaniem skanowanego modelu przedstawiono w publikacji [3].

Wnioski

W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania technik skanowania 3D w celu pozyskania złożonych geometrii



Rys. 2. Porównanie obliczeń numerycznych i badań: a) model skanowany; b) wynik badania

Fig. 2. Comparison of numerical calculations and tests: a) scanned model; b) test result

próbek testowych do obliczeń numerycznych. Skanowanie 3D umożliwia wierne odwzorowanie rzeczywistej konstrukcji ze znacznie większą dokładnością niż tradycyjne pomiary. Ma to szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji o skomplikowanym kształcie, takich jak profile systemu ABM. Skanowany model z łatwością można eksportować do numerycznych programów obliczeniowych MES (np. *Abaqus*, *Ansys*), które umożliwiają wykonanie złożonych analiz numerycznych.

Fotografie: R. Cybulski, rysunki: A. Piekarczuk

Literatura

- [1] Cybulski Robert, Ryszard Walentyński, Monika Cybulska. 2014. „Local Buckling of Cold-Formed Elements Used in Arched Building with Geometrical Imperfections”. *Journal of Constructional Steel Research* 96 (May): 1–13. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.01.004.
- [2] Mang A Herbert. 1976. „Finite Element Analysis of Doubly Corrugated Shells”. *Journal of the Structural Division* 102 (10). ASCE: 2033 – 51. <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0006980>.
- [3] Piekarczuk Artur, Krzysztof Malowany. 2016. „Comparative Analysis of Numerical Models of Arch-Shaped Steel Sheet Sections”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 16 (4): 645 – 58. DOI: 10.1016/j.acme.2016.04.006.

Przyjęto do druku: 12.01.2019 r.