

**SCIENTIFIC  
STUDIES**  
Monographs

**PRACE  
NAUKOWE**  
Monografie

Artur Piekarczyk

Doświadczalne i obliczeniowe  
metody oceny łukowych przekryć  
z blach podwójnie giętych

Experimental and computational evaluation  
methods of arch-shaped roofs  
made of doubly corrugated shells



Instytut Techniki Budowlanej

Warszawa 2018

## KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor naczelny	prof. dr hab. inż. LECH CZARNECKI
Zastępcy redaktora naczelnego	prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI dr hab. inż. JADWIGA FANGRAT
Sekretarz	dr MICHAŁ GAJOWNIK
Członkowie	dr hab. inż. PAWEŁ LEWIŃSKI, prof. ITB dr inż. TERESA MOŻARYN mgr inż. JAN SIECZKOWSKI dr inż. EWA SZEWCZAK dr inż. SEBASTIAN WALL

### Recenzenci

prof. dr inż. LESŁAW BRUNARSKI  
dr hab. inż. LESZEK SAŁBUT, prof. PW  
prof. dr inż. WOJCIECH WŁODARCZYK

### Redakcja

dr MICHAŁ GAJOWNIK

### Opracowanie komputerowe

SŁAWOMIR KOSIARSKI

© Copyright by Instytut Techniki Budowlanej  
Warszawa 2018

*Czterysta sześćdziesiąta siódma pozycja  
„Prac Naukowych ITB”*

ISBN 978-83-249-8502-9

ISBN 978-83-249-8503-6 dla wersji pdf

Wydawca i Autorzy dołożyli wszelkich starań, aby publikowane informacje pochodziły z rzetelnych źródeł. Wydawca nie ponosi odpowiedzialności ani też nie zaciąga zobowiązań w wyniku wykorzystania przez użytkowników treści niniejszej publikacji. W szczególności nie ponosi odpowiedzialności w stosunku do czytelników i/lub strony trzeciej za jakiegokolwiek poniesione straty, wydatki i szkody bezpośrednie i pośrednie, łącznie z utratą zysku i innych korzyści majątkowych, które mogły powstać lub być związane bezpośrednio lub pośrednio z treściami opublikowanymi, w tym ewentualnymi błędami lub pominięciami zawartymi w publikowanych materiałach.



**Instytut Techniki Budowlanej**

Sekcja Wydawnictw Naukowych

02-656 Warszawa, ul. Ksawerów 21, tel.: 22 843 35 19

tel.: 22 56 64 208, e-mail: [wydawnictwa@itb.pl](mailto:wydawnictwa@itb.pl), [www.itb.pl](http://www.itb.pl)

## Spis treści

<i>Streszczenie</i> .....	5
<i>Summary</i> .....	9
1. Wprowadzenie .....	13
2. Przekrycia łukowe z podwójnie giętych blach profilowanych .....	17
2.1. Geneza przekryć łukowych z blach podwójnie giętych .....	17
2.2. Przegląd technologii podwójnie giętych przekryć łukowych.....	20
2.3. Stal stosowana do produkcji podwójnie giętych blach profilowanych.....	32
3. Studium problemów projektowania i oceny przekryć z podwójnie giętych blach profilowanych.....	39
3.1. Archiwalna dokumentacja systemowa K-span ABM .....	39
3.2. Trudności projektowe i ich skutki.....	43
3.3. Identyfikacja zaistniałych problemów .....	46
3.4. Zadania podjęte w celu rozwiązania wybranych problemów projektowania przekryć łukowych .....	52
4. Metodyka realizowanych badań eksperymentalnych przekryć łukowych.....	57
4.1. Założenia .....	57
4.2. Badania elementów w skali mikro .....	59
4.3. Badania elementów w skali makro .....	68
4.4. Optyczny układ pomiarowy metodą CKO.....	79
5. Zastosowane procedury analiz numerycznych.....	83
5.1. Wstęp .....	83
5.2. Opis i ograniczenia zastosowanej metody elementów skończonych.....	84
5.3. Weryfikacja i walidacja obliczeń numerycznych .....	90
5.4. Wybór modelu materiału stali w blachach profilowanych.....	92
5.5. Przygotowanie modelu obiektu do analiz numerycznych .....	106
6. Wyniki własnych badań eksperymentalnych .....	125
6.1. Badania właściwości stali.....	125
6.2. Wyniki badań elementów próbnych w skali mikro .....	126
6.3. Wyniki badań elementów próbnych w skali makro.....	131
7. Wyniki analiz numerycznych i porównanie z wynikami badań eksperymentalnych .....	147
7.1. Element próbny w skali mikro .....	147
7.2. Element próbny w skali makro .....	162
7.3. Podsumowanie porównania wyników badań i obliczeń.....	174
7.4. Komentarz do wyników obliczeń pełnowymiarowych elementów próbnych .....	179

8. Autorski algorytm obliczeń cienkościennych struktur łukowych z blach podwójnie giętych .....	183
8.1. Koncepcja algorytmu obliczeń .....	183
8.2. Algorytm obliczeń .....	185
8.3. Kryterium nośności elementu prętowego .....	210
9. Podsumowanie i wnioski.....	221
Bibliografia.....	227

## 1. WPROWADZENIE

Budownictwo to dyscyplina nauki, w której teoria zawsze zmierza do praktyki, wyznaczając obszary użyteczne w pracy projektantów i architektów. Większość tych obszarów jest jednoznacznie zdefiniowana, na przykład przez zestawy dokumentów normatywnych, dotyczących określonego zagadnienia. Występują jednak takie obszary, w których obecny stan wiedzy wydaje się być niekompletny. Takie stwierdzenie jest tylko domniemaniem, dopóki nie zostanie skonfrontowane z własnymi doświadczeniami w tej materii. Wówczas badacz, teoretyk lub praktyk staje przed trudnym wyzwaniem poznania i opisanie zjawiska, które wymyka się szablonowym regułom. Jest to dla niego proces żmudny, a wyniki prac w początkowej fazie i przy niedostatecznym doświadczeniu mogą rozczarowywać. Dopiero później, przy zgłębianiu tematyki, odkrywa się nowe, nierozpoznane jeszcze obszary, których wypełnienie własnym pomysłem daje wiele satysfakcji, ale przede wszystkim porządkuje i rozszerza dotychczasowy stan wiedzy oraz przybliża go do poziomu uniwersalnego, przydatnego do stosowania nie tylko dla autora pomysłu, lecz także dla innych badaczy, naukowców i praktyków.

Wśród wielu prac badawczych i analitycznych z zakresu mechaniki konstrukcji prowadzonych w Instytucie Techniki Budowlanej inicjowano różne badania, od prostych i powtarzalnych, aż po badania i analizy prototypowych rozwiązań technicznych, dalece odbiegających od standardowych rozwiązań. Jednym z takich niestandardowych zadań były badania i obliczenia samonośnych, podwójnie giętych przekryć łukowych, wykonanych z cienkościennych blach profilowanych. Celem badań i obliczeń było wyznaczenie dopuszczalnego obciążenia z uwagi na nośność i stateczność takiego przekrycia. Badania miały być przydatne do opracowania modelu numerycznego i wykorzystania go w pracach projektowych przy zmiennych parametrach konstrukcyjnych (różne rozpiętości, wysokości, zróżnicowany gatunek stali). Początkowo wydawało się, że jest to zadanie wykonalne, utrudnione jedynie gabarytami badanego ustroju (obiekt w postaci fragmentu łuku miał rozpiętość 9,4 m, wysokość 1,9 m i szerokość 2,4 m). Program badań dostosowano do osiągnięcia wyznaczonego wcześniej celu przy wykorzystaniu wystarczających (jak wówczas przypuszczano) zasobów wiedzy i metod pomiarowych oraz metod

obliczeń. Porównanie wyników badań i obliczeń przyniosło jednak rozczarowanie. Okazało się bowiem, że wyniki obliczeń nie korespondują z wynikami badań, a ujawnione rozbieżności wykraczają poza rozsądne (z praktycznego punktu widzenia) granice. Nie wykryto błędów w badaniach, aparatura pomiarowa była sprawna, a metoda badania adekwatna do założonego celu. Obliczenia wykonano zgodnie z normami przedmiotowymi i – mimo uproszczeń do modelu prętowego – przyjęta metoda wydawała się racjonalna. Wnioski z analizy tego zdarzenia postrzegano jako oczywiste. Opis modelu obliczeniowego jest niekompletny, nie zawiera bowiem zjawisk determinujących rzeczywiste zachowanie się tego typu konstrukcji. Zatem przydatność obliczeń w tej formie do oceny konstrukcji jest co najmniej umiarkowana. Pomimo skromnych danych pozyskanych z pierwszych własnych badań, zwrócono uwagę na mechanizm zniszczenia. Zaobserwowano powstawanie silnych lokalnych zaburzeń nośności ustroju.

Kolejne prace badawcze kontynuowano na ustroju o większych gabarytach (fragment przekrycia łukowego o rozpiętości 12 m, wysokości 6 m i szerokości 2,4 m). Tym razem zastosowano już znacznie dokładniejsze metody pomiarowe i dostosowane do obserwacji wybranego pola pomiarowego. W tym celu wykorzystano metodę wizyjną, tzw. cyfrową korelację obrazu (w skrócie CKO). W metodzie obliczeń porzucono modele prętowe na rzecz numerycznych modeli powłokowych, które znacznie dokładniej opisywały zachowanie się ustroju. Wyniki pracy były bardziej obiecujące niż poprzednio. Zidentyfikowano jakościowo krytyczne obszary ustroju, zaproponowano hybrydową metodę oceny, tj. metodę numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych, sprzężoną z cyfrową korelacją obrazu. Praca ta, mimo swoich walorów poznawczych, była obciążona zasadniczą niedogodnością. Jej praktyczne wykorzystanie ograniczono do zastosowań testowych w warunkach laboratoryjnych przy użyciu specjalistycznych urządzeń pomiarowych i programów obliczeniowych. Taki stopień zaawansowania prac budził pewien niedosyt. Zjawisko fizyczne związane z niestabilnością lokalną ustroju zostało dostrzeżone, jednak sposób identyfikacji procesów w nim zachodzących nie miał w pełni użytecznych cech ani walorów uniwersalności przydatnych do stosowania dla przeciętnego projektanta.

Również w pracach eksperckich, realizowanych w Instytucie Techniki Budowlanej, tematyka przekryć łukowych wykonanych z cienkościennych podwójnie giętych blach stalowych pojawiała się wielokrotnie. Trudności, jakie ujawniły się przy analizie tego typu konstrukcji, nie sprzyjały rzetelnej i kompleksowej ocenie. Jak się okazało, normatywne metody ob-

liczeń mogły służyć jedynie do przybliżonej oceny konstrukcji. Poszukiwanie odpowiednich metod projektowania okazało się trudne, ponieważ brakuje pozycji literaturowych wystarczająco szczegółowo przedstawiających tę problematykę. Metody, które można znaleźć w czasopismach technicznych i naukowych, są w znacznej mierze rozproszone i dotyczą jedynie niewielkiej części zagadnień badawczych i konstrukcyjnych oraz są autorskimi pomysłami różnych naukowców i badaczy. Trudno więc było powiązać je w jeden syntetyczny materiał przydatny do dalszych prac naukowych, a także użyteczny dla projektantów zajmujących się tą tematyką.

Dalsze prace nad problemem przekryć łukowych z blach podwójnie giętych zostały ukierunkowane na wyeliminowanie wymienionych niedogodności. Instytut Techniki Budowlanej, wraz z przedstawicielem przemysłu i Politechniki Warszawskiej (Wydział Mechaniki), zrealizował projekt badawczy z Programu Badań Stosowanych nr PBS1/A2/9/2012, finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, pt. „Opto-liczebne metody badań i monitorowania niskokosztowych obiektów użyteczności publicznej z cienkościennych blach profilowanych”. Projekt ten w znacznym stopniu był inspiracją do powstania niniejszej monografii. Prowadzone w ramach projektu prace badawcze i analityczne wskazywały nowe zadania, których realizacja okazała się dużym wyzwaniem, ale też fascynacją. Monografia jest kontynuacją tych prac.

Zasadniczą motywacją do podjęcia prac nad monografią (z inspiracji publikacjami [1], [2]) była potrzeba dokonania kompleksowej analizy problemów badawczych i obliczeniowych związanych z przedstawioną tematyką i zaproponowanie autorskich rozwiązań naukowych, wskazanie procedur badawczych i obliczeniowych oraz ich interpretacji w sformułowanych regułach obliczania omawianych łukowych struktur z blach podwójnie giętych.

Intencją autora monografii jest syntetyczne przedstawienie sposobu rozwiązania problemów, z którymi autor spotkał się podczas własnych prac eksperymentalnych i badawczych, a także wskazanie możliwych dalszych kierunków rozwoju i być może inspiracji dla przyszłych badaczy zgłębiających tę tematykę.

Praktyczna strona nauki jest motywem przewodnim niniejszej monografii. Założono bowiem, że wyniki prac badawczych, obliczeniowych i studialnych, oprócz rozwiązania stanowiącego osiągnięcie poznawcze pod względem naukowym, posłużą do wskazania praktycznych zaleceń dotyczących metod badań i sposobu obliczeń przekryć łukowych wykonanych z cienkościennych blach profilowanych.

## **2. PRZEKRYCIA ŁUKOWE Z PODWÓJNIE GIĘTYCH BLACH PROFILOWANYCH**

### **2.1. Geneza przekryć łukowych z blach podwójnie giętych**

Lekkie łukowe przekrycia poprzedzał system Quonset Hut [3]. Był to system konstrukcyjny, który powstał w latach czterdziestych XX wieku w odpowiedzi na zapotrzebowanie amerykańskiego wojska na lekkie, łatwe i szybkie w montażu tymczasowe obiekty, przeznaczone do doraźnych potrzeb militarnych. Nazwa wywodzi się od przylądka Quonset na terenie bazy Seabees batalionów roboczych US Navy (*United States Navy Construction Battalions*) w North Kingstown w stanie Rhode Island, gdzie po raz pierwszy wzniesiono tego typu konstrukcje. Pierwsze prace projektowe nad opracowaniem systemu Quonset Hut podjął w 1941 r. zespół inżynierów pod kierownictwem Ottona Brandenbergera i patronatem George'a A. Fullera. Zespół rozwijał koncepcję lekkiego tymczasowego budynku, opracowanego przez Petera Normana Nissena z British Royal Engineers, który w czasach pierwszej wojny światowej zaproponował alternatywne i trwalsze rozwiązanie obiektu w porównaniu do tradycyjnych namiotów wojskowych. Była to stalowa konstrukcja łukowa z pokryciem z blachy stalowej o nazwie Nissen Bow Hut. Koncepcja rozwoju Quonset Hut, bazującego na Nissen Bow Hut, była precyzyjnie określona przez wymagania armii USA i dotyczyła dwóch podstawowych kwestii. Hala powinna mieć zadaszenie w kształcie łuku w celu uzyskania odpowiedniej nośności oraz być łatwo i szybko montowana. Pierwsze obiekty wykonywano jako jednopowłokowe poszycia oparte na łukowej konstrukcji wsporczej. Następne powstawały jako dwupowłokowe, zapewniające większy komfort użytkowania obiektów (rys. 2.1).

Ciekawą innowację w konstrukcji hal wprowadził zespół Brandenbergera i Fullera. Zaproponowano zakrzywienie łukowe zewnętrznego, profilowanego pokrycia hali (rys. 2.2), co w początkowej fazie wdrożenia nastroczało wiele kłopotów. Mimo trudności technicznych dostrzeżono zalety tak wyprofilowanej powłoki. Okazało się bowiem, że wykazuje ona cechy samonośne, w związku z tym nie ma potrzeby stosowania kłopotliwej w montażu konstrukcji wsporczej. Zalety takiego rozwiązania szybko zyskały popularność i wraz z postępowaniem technologicznym zyskiwały nową



formę konstrukcyjną, tj. samonośnych przekryć łukowych stosowanych jako zadaszenia budynków.



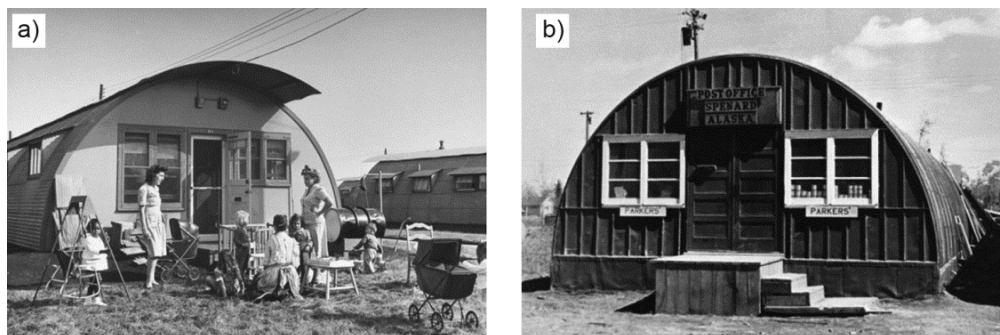
*Rys. 2.1. Hale systemu Quonset Hut (1942) [3]*



*Rys. 2.2. Proces zakrzywiania blach profilowanych (1941) [3]*

Po zakończeniu II wojny światowej technologia hal Quonset Hut zyskała dużą popularność w budownictwie cywilnym. Powstawały nowe modyfikacje systemu. Nastąpił intensywny transfer pomysłów i technologii z zastosowań wojskowych do cywilnych. Kierunki rozwoju technologii były zorientowane na uzyskanie łatwej w montażu, modułowej prefabrykowanej konstrukcji, możliwej do zmontowania przez niewielki zespół monterów. Dostępność tej technologii w USA w drugiej połowie lat czterdziestych i pięćdziesiątych XX w. w znacznym stopniu łagodziła dotkliwe skutki działań wojennych. Pierwotnie przyjęta koncepcja budynku tymczasowego ewoluowała w kierunku trwałych zasto-

sowań w odniesieniu nie tylko do budynków mieszkalnych, lecz także obiektów użyteczności publicznej (rys. 2.3). Powstawały nawet całe osiedla z budynkami mieszkalnymi wzniesionymi w tej technologii, jak na przykład „Rodger Young Village” [4] w Los Angeles, składające się z 750 domów wzniesionych w 1946 r. (rys. 2.4), albo rozbudowane kompleksy hal produkcyjnych przemysłu filmowego z 1955 r., tj. studio B wytwórni filmowej Columbia Records w Nashville.



Rys. 2.3. Adaptacja technologii Quonset Hut do zastosowań cywilnych  
a – budynek mieszkalny, b – budynek użyteczności publicznej (poczta) [3]



Rys. 2.4. Osiedle mieszkaniowe „Rodger Young Village” w Los Angeles [4]

Dalszy rozwój koncepcji przekryć łukowych z podwójnie giętych blach stalowych stanowiły liczne modyfikacje systemu Quonset Hut, zwane następnie K-span, które przystosowywały technologię do konkretnych potrzeb i przeznaczenia obiektów budowlanych, realizowanych przez różne podmioty gospodarcze. Z czasem obiekty cywilne wznoszone w tej technologii traciły popularność z uwagi na ograniczone możliwości aranżacji architektonicznej i urbanistycznej. Budownictwo cywilne odchodziło od tych rozwiązań, ale w zastosowaniach wojskowych nadal były chętnie wykorzystywane. Okazało się, że jest to zaledwie tymczasowy spadek popularności technologii K-span w zastosowaniach cywilnych. Pamiętano bowiem, że prostota konstrukcji idzie w parze nie tylko z łatwością i szybkością montażu, lecz także z oszczędnością zużycia coraz droższego materiału, jakim okazała się stal budowlana.

## **2.2. Przegląd technologii podwójnie giętych przekryć łukowych**

### **2.2.1. Wstęp**

Rozwój technologii walcowania blach stalowych w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych XX w. umożliwił wdrożenie nowych koncepcji konstrukcyjnych. Kłopotliwe w latach czterdziestych zakrzywianie blach profilowanych, zaproponowane przez zespół Brandenbergera i Fullera, w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych przestało być przeszkodą. Nowe możliwości technologiczne pozwoliły na znaczną minimalizację elementów składowych konstrukcji. W efekcie powstała technologia przekryć samonośnych bez konstrukcji wsporczej, stosowana głównie w budownictwie wojskowym. Obiekty te powstawały przeważnie w miejscach pozbawionych specjalistycznej infrastruktury z ograniczonym dostępem do materiałów budowlanych. Miały one powstawać szybko, tanio i bez nadmiernego angażowania zespołów roboczych. Tym samym wznowiona została idea wprowadzona w latach czterdziestych przez twórców systemu hal łukowych Quonset Hut. Konstrukcja przekrycia miała być tania, lekka i łatwa w montażu. Taka koncepcja przekryć dachowych zyskała dużą popularność w kolejnych dekadach. Nastąpił jej dynamiczny rozwój w sektorze obiektów cywilnych, głównie za sprawą dostępności technologii wytwarzania tego typu elementów. Nazewnictwo poszczególnych odmian systemu K-span kształtował rynek wytwórców, który często obejmował te same obszary budownictwa (obiekty mieszkalne, rolnicze, użyteczności publicznej).