

Optymalne kształtowanie konstrukcji drewnianych w kontekście współczesnych tendencji w architekturze

Streszczenie

Rozwój współczesnego budownictwa jest ukierunkowany na minimalizowanie zużycia energii. Optimalizacja procesów budowlanych to oczywiste działanie, które towarzyszy procesowi projektowania od samego początku. Jest to szczególnie istotne w dobie cyfryzacji narzędzi projektowania, a także wykorzystywania w architekturze krzywoliniowych modeli bionicznych. Umiejętność racjonalnego dostosowania materiału do potrzeb strukturalnych obiektu oraz dążenie do jego efektywnego wykorzystania to jeden z bardziej istotnych warunków zrównoważonej architektury. Rozwiązania techniczne w budownictwie zapewniające wykorzystanie odnawialnej energii, stają się coraz ważniejsze wobec potrzeby poszanowania zasobów naturalnych. W kontekście tych przemian warte uwagi jest wykorzystanie drewna naturalnego w konstrukcjach. W ostatnim czasie postępuje dynamiczny rozwój technologii obróbki drewna, a także narzędzi do modelowania i analizy konstrukcji drewnianych. Artykuł odnosi się do zagadnień związanych z optymalnym kształtowaniem form strukturalnych z drewna, ze szczególnym uwzględnieniem współpracy architektoniczno-konstrukcyjnej. Celem pracy jest przegląd obecnych tendencji wykorzystania drewna konstrukcyjnego oraz poznanych metod analizy statyczno-wytrzymałościowych dla tego materiału.

Słowa kluczowe

konstrukcje drewniane | interdyscyplinarne projektowanie | drewniane przekrycia strukturalne | prośrodowiskowy materiał budowlany

Mariusz Wrona, mgr inż.
Wydział Architektury
Politechnika Warszawska

Mariusz Wrona, MSc Eng.
Faculty of Architecture
Warsaw University of Technology

1. Wprowadzenie

We współczesnej architekturze obserwowany jest wzrost zainteresowania naturalnymi technologiami budowlanymi, zwłaszcza takimi, których ślad węglowy jest niewielki. Tendencje te, podyktowane potrzebą zmniejszenia karbonizacji w przemyśle budowlanym sprawiają, że drewno oraz technologie jego obróbki to obecnie jedno z bardziej interesujących zagadnień w rozwoju tego sektora. Dodatkowym atutem jest odnawialność surowca, która jednocześnie pociąga za sobą proces intensywnego pochłaniania dwutlenku węgla. W tym kontekście drewno dostarcza wyraźnie synergicznych rozwiązań dla współczesnego budownictwa, wpisując się w założenia gospodarki cyrkularnej. Z jednej strony, dzięki m.in. technologiom klejenia, drewno

jest wykorzystywane jako alternatywna konstrukcja nośna czy wypełnienie przegród (o dobrych właściwościach izolacyjnych), z drugiej strony aktywnie i pasywnie kumuluje zanieczyszczenia atmosfery. Uniwersalne właściwości drewna i możliwość jego dostosowania do pełnionej w elementach budowlanych funkcji umożliwiają jego dalszą eksplorację we współczesnym budownictwie.

Współczesne technologie obróbki drewna dostarczają nowych możliwości kształtowania racjonalnych elementów strukturalnych. Przykładami takich działań są: prefabrykacja elementów z drewna klejonego (CLT, LVL, HBE itp.), stanowiąca wyraźną alternatywę dla innych typów konstrukcji, oraz technologie związane zklejeniem i gięciem drewna. Dotykają one obszarów, które nie są jeszcze wystarczająco rozwinięte. Pierwszym z nich jest kształtowanie krzywoliniowej architektury, której nadrzędnym celem coraz częściej jest efektywność konstrukcyjna, przejawiająca się w redukcji zbędnej geometrii¹. Drugi dotyczy bezpośrednio narzędzi cyfrowego modelowania formy, opartych na interdyscyplinarnej współpracy. Oba elementy opierają się na korelacji architektoniczno-konstrukcyjnej i wymuszają rozwój specjalności, narzędzi, a wreszcie badań podstawowych w zakresie optymalnego kształtowania konstrukcji drewnianych.

Taki stan rzeczy sprawia, że szczególnie interesujące jest zastosowanie drewna konstrukcyjnego w obiektach, których geometria wykracza poza paradygmaty geometrii euklidesowej. To działanie wymaga zaawansowanych technologii obróbki, a także dużej świadomości materiału – jego struktury budowy i właściwości wytrzymałościowych². Poniższy przegląd zrealizowanych obiektów, technologii budowlanych oraz metod związanych z modelowaniem i analizą konstrukcji odnosi się do przykładów architektury bionicznej, której istotą jest poszukiwanie synergii pomiędzy estetyką formy i logiką rozwiązań strukturalnych.

2. Modelowanie konstrukcji drewnianych w odniesieniu do aktualnych norm

Drewno jest poznanym i powszechnie stosowanym materiałem w konstrukcjach budowlanych, który opisują liczne podręczniki oraz dokumenty normowe. Dla krajów europejskich wprowadzono Eurokody, które zawierają wytyczne do projektowania konstrukcji drewnianych. Wspólne zasady projektowe zostały określone w dokumencie: *Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków*³. W normie zostały opisane zasady projektowania konstrukcyjnego w zakresie stanów granicznych nośności oraz użyteczności. Przepisy zawarte w tym dokumencie

¹ E. Gawell, A. Nowak, W. Rokicki, *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", 2019, nr 471, s. 1–10.

² E. Gawell, *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration* w: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, red. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, t. 1, Hong-Kong 2021, s. 473–482.

³ Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków. P.4 Stany graniczne nośności; P.5 Stany graniczne użyteczności; Skrypt jest dostępny na stronie <http://pobierz.intersoft.pl/konkurs/EUROKODY/EUROKODY-Projektowanie-konstrukcji-drewnianych.pdf> (dostęp 30.11.2021).

powinny być stosowane przez inżynierów prowadzących działalność projektową w krajach Unii Europejskiej. Dodatkowo Eurokody zawierają krajowe załączniki NA „National Appendix” stanowiące wytyczne uwzględniające np. specyfikę stosowanych materiałów lub stanowiące uzupełnienia reguł ogólnych m.in. poprzez wprowadzenie wartości liczbowych do występujących w normie symboli⁴. Eurokody dostarczają również informacji na temat stosowanego systemu klas wytrzymałości. Klasyfikację poszczególnych gatunków drewna używanego w budownictwie oraz sposób kwalifikowania poszczególnych gatunków do odpowiedniej klasy zawiera Eurokod PN-EN 338:2011. Drewno konstrukcyjne. Klasy wytrzymałości⁵. Charakterystyki fizyczne i wytrzymałościowe drewna pochodzące z drzew iglastych takich jak: sosna, modrzew czy świerk oraz drzew liściastych – np. buk, dąb, jesion, klon, lipa, olcha, topola, można odnaleźć również w literaturze technicznej⁶.

Wraz z upowszechnianiem się konstrukcji drewnianych we współczesnym budownictwie następuje rozwój technologii materiałowych. Z jednej strony rośnie wachlarz gatunków drzew, które są wykorzystywane w kształtowaniu konstrukcji. Z drugiej zaś, metody wzmacniania drewna (np. klejenie, taśmy wzmacniające z włókna szklanego czy aramidowego itp.) dostarczają nowych możliwości projektowych. Rozwój ten nie tylko pobudza kreatywność projektantów do poszukiwania nietypowych rozwiązań przestrzennych, ale jednocześnie wymaga ciągłego aktualizowania norm, baz danych i katalogów do cyfrowych analiz wytrzymałościowych.

W projektowaniu konstrukcji drewnianych za podstawowe parametry bezpieczeństwa odpowiada wytrzymałość na ściskanie wzdłuż i w poprzek włókien, wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż i w poprzek włókien, wytrzymałość na zginanie czy wytrzymałość na ścinanie w kierunku wzdłuż i w poprzek włókien. Parametry wytrzymałościowe stosowane są podczas weryfikacji konstrukcji zgodnie z formułami zawartymi w Eurokodzie. W typowych konstrukcjach drewnianych o wyężeniu elementu drewnianego oprócz charakterystyk wytrzymałościowych decydują schematy statyczne ukształtowanej konstrukcji, układ i wartość oddziaływań normowych, warunki brzegowe (podporowe) i występujące w związkach konstytutywnych cechy fizyczne materiału (moduły sprężystości). Analiza statyczna prowadzi do uzyskania sił wewnętrznych oraz stanu naprężeń, a następnie, po uwzględnieniu parametrów wytrzymałościowych, do weryfikacji nośności. Stany graniczne konstrukcji kontroluje się poprzez porównanie uzyskanych naprężeń z parametrami wytrzymałościowymi. Do granicznych stanów nośności należy zaliczyć także kontrolę granicznej krzywizny, przy której następuje pojawienie się pierwszego pęknięcia. Ten rodzaj stanu granicznego jest istotny dla konstrukcji wstępnie wygiętych. Krzywizna graniczna może być wyznaczana analitycznie na

⁴ PN-EN 1995-1-1:2010/NA. Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1–1: Postanowienia ogólne - Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.

⁵ PN-EN 338:2016-06. Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.

⁶ J. Kotwica, *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011; autor w rozdziale 3 *Mechaniczne właściwości drewna i materiałów drewnopochodnych* podaje charakterystyki fizyczne i wytrzymałościowe materiałów.

podstawie wzoru na zginanie uzależniającego krzywiznę graniczną wygiętego elementu z podawaną w Eurokodzie wytrzymałością przy zginaniu $\sigma_{cr} = f_m^7$:

$$\sigma_{cr} = \frac{M \cdot z}{I}, \text{ gdzie } M = \kappa \cdot EI$$

Powyższe informacje stanowią podstawę do analizy form bionicznych budowanych z drewna. Bardzo często, zwłaszcza w przypadku nietypowych budowli, normowe bazy materiałowe uzupełniane są badaniami doświadczalnymi.

3. Wybrane metody modelowania konstrukcji drewnianych – analiza statyczna i modele obliczeniowe

Współczesne tendencje w architekturze nastawione są na interdyscyplinarność procesu projektowego. W ślad za tym podążają cyfrowe narzędzia współpracy wielobranżowej. W zależności od przyjętej metody kształtowania formy, planowane są procesy jej optymalizacji strukturalnej. Poniżej zostały przedstawione analityczne metody projektowania obiektów kształtowanych z drewna.

3.1. Analiza liniowa

Najczęściej stosowaną metodą analizy statycznej jest obecnie liniowa Metoda Elementów Skończonych *Finite Element Method, FEM*⁸. Modele obliczeniowe przygotowywane przez inżynierów statyków zakładają projektowaną przez architekta geometrię, która obecnie jest tworzona przy zastosowaniu coraz bardziej zaawansowanych narzędzi cyfrowych. Przy pomocy metody FEM można wykonywać analizy z pominięciem tzw. efektów drugiego i trzeciego rzędu, charakterystycznych dla analiz nieliniowych. W analizie liniowej zakłada się liniową zależność stanu naprężeń konstrukcji oraz stanu odkształceń. Popularna wśród inżynierów konstruktorów metoda FEM pozwala na określenie sił wewnętrznych panujących w konstrukcji, zautomatyzowaną kontrolę Stanów Granicznych Nośności *Limit State Analysis LSL* oraz Stanów Granicznych Użytkowalności *Serviceability Limit State SLS* zgodnie z regułami zawartymi w opracowaniu *PN- EN 1990:2004. Eurokod- Podstawy projektowania konstrukcji*⁹. Popularne na rynku Europejskim programy obliczeniowe wykorzystujące FEM mają bowiem wbudowane moduły do weryfikacji normowych formuł wytrzymałościowych. Do programów tych można zaliczyć *Autodesk Robot Structural Analysis* firmy *Autodesk*, *RFEM6* firmy *Dlubal Software* lub pakiet *SCIA Engineer* firmy *Nemetchek*. Automatyczny proces weryfikacji normowej poszczególnych elementów konstrukcyjnych sprowadza się do ustalenia kilku wyjściowych parametrów, takich jak długość pręta, model wybożeniowy i zwirzeniowy pręta, wpływ sęków (imperfekcji) czy np. wilgotność drewna w warunkach eksploatacji.

⁷ E. Adiels et al., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, s. 2–3, 5.

⁸ A.M. Bauer et al., *Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018, s.1–2.

⁹ Terminy anglojęzyczne pochodzą z angielskiej wersji *Eurokod 5*.

Bardziej skomplikowanym procesem jest analiza węzłów, gdzie z reguły w konstrukcjach drewnianych występuje zniszczenie materiału. Popularne pakiety do projektowania konstrukcji mają stosunkowo małe możliwości analizy węzłów, ograniczające się do typowych węzłów powszechnie stosowanych w konstrukcjach drewnianych. Połączenia (węzły konstrukcyjne) modelowane są indywidualnie bardzo często w innych aplikacjach niż program, w którym przeprowadzono analizę całego ustroju konstrukcyjnego. Podczas analizy węzłów konstruktorzy także wykorzystują metodę FEM. Budowane w tym celu modele powłokowe lub bryłowe węzłów konstrukcyjnych dostarczają projektantowi informacji na temat stanu naprężeń panujących w poszczególnych elementach tworzących węzeł konstrukcyjny.

Pomimo ignorowania efektów drugiego czy trzeciego rzędu metoda FEM może być stosowana dla bardzo wyrafinowanych konstrukcji. Analizy FEM stosowane są dla konstrukcji, które ze względu na pomijalny wpływ deformacji na siły wewnętrzne nie wymagają analiz nieliniowych. Przykładem konstrukcji drewnianej analizowanej za pomocą FEM jest budynek Treet zrealizowany w Bergen (Norwegia) (il. 1). Budynek powstał w 2015 roku w wyniku współpracy biura architektonicznego Artec oraz firmy SWECO, przy wsparciu zespołu naukowo-badawczego z Norwegian University of Science and Technology (NTNU w Trondheim)¹⁰. Szkielet konstrukcji 14-kondygnacyjnego obiektu o wysokości konstrukcji 52.8 m stanowią prefabrykowane panele zrealizowane w technologii CLT. Analiza konstrukcji została przeprowadzona przy wykorzystaniu programu Robot Structural Analysis Professional 2013. Dzięki szczegółowemu modelowi oraz zoptymalizowanej logistyce montaż poszczególnych sprefabrykowanych modułów obiektu przebiegł niezwykle sprawnie oraz, co zasługuje na szczególne uznanie, bardzo dokładnie. Warto nadmienić, że maksymalna odchyłka zmontowanej konstrukcji dla tego wysokiego obiektu wyniosła jedynie 3 mm.

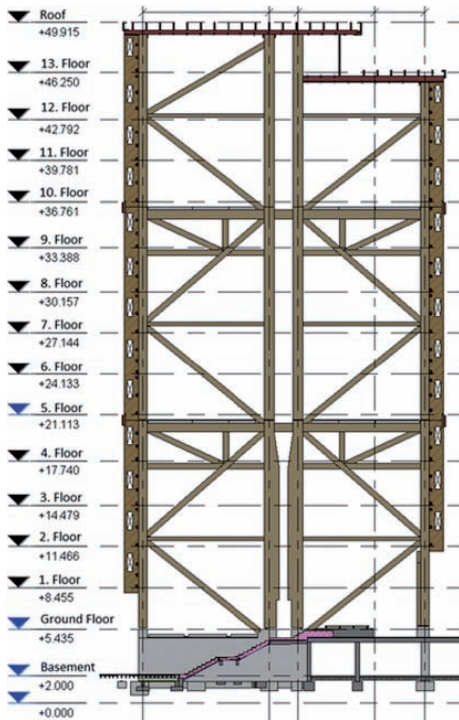
3.2. Analiza nieliniowa geometrycznie

Metody analizy FEM liniowej nie zawsze dają prawidłowy obraz zachowania konstrukcji. Podczas analiz konstrukcji – tak prętowych, jak i powłokowych – wymagane są często bardziej zaawansowane metody uwzględniające nieliniowość procesów zachodzących podczas pracy konstrukcji. Do pojawiających się nieliniowości dochodzi w sytuacji, gdy konstrukcja charakteryzuje się dużymi deformacjami, skutkującymi pojawieniem się efektów drugiego rzędu (*second-order effects*) lub trzeciego rzędu (*third-order effects*). Do metod wykorzystywanych w analizach nieliniowych zalicza się metodę *P-Delta* oraz metodę dużych przemieszczeń *Large Displacements Analysis*. Analiza *P-Delta* (*second-order effects*) uwzględnia zmianę sztywności elementu prętowego w zależności od sił podłużnych natomiast metoda *Large Displacements Analysis* uwzględnia efekty trzeciego rzędu tj. pojawienia się dodatkowych sił w zależności od deformacji konstrukcji¹¹. Metody nieliniowe będą

¹⁰ R. Abrahamsen, K. Malo, M. Bjertnæs, *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016, s. 407–423.

¹¹ Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021, <https://help.autodesk.com/view/RSAPRO/2021/PLK/?guid=GUID-FB3C86D3-0E30-43A6-82D6-6C50F429FA0D> (dostęp 30.11.2021).

1a.



1b.



1. Budynek mieszkaniowy wielorodzinny „Tree” w Bergen (Norwegia), 2015, architekt: Artec. projektant konstrukcji: Sweco AB: a) schemat szkieletowej konstrukcji budynku; b) widok obiektu. Źródło: R. Abrahamsen, K.A. Malo, *Structural design and assembly of “tree” – a 14-storey timber residential building in Norway*, w: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*, red. A. Salenikovich, Red Hook 2018

1. Multifamily residential building „Tree” in Bergen (Norway), 2015, architect: Artec Structural designer: Sweco AB: a) diagram of the skeleton structure of the building; b) view. Source: R. Abrahamsen, K.A. Malo, *Structural design and assembly of “tree” – a 14-storey timber residential building in Norway*, in: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014)*, ed. A. Salenikovich, Red Hook 2018

miały zastosowanie zawsze tam, gdzie w konstrukcji występują znaczne deformacje, których nie można pominąć w analizie statycznej. Tego typu analizy będą konieczne w przypadku ustrojów konstrukcyjnych, w skład których wchodzi elementy membranowe, ścięgnowe lub kablone. Elementy takie często uzupełniają konstrukcje drewniane i pracują w charakterze ścięgien stężających lub sprężających.

3.3. Form Finding

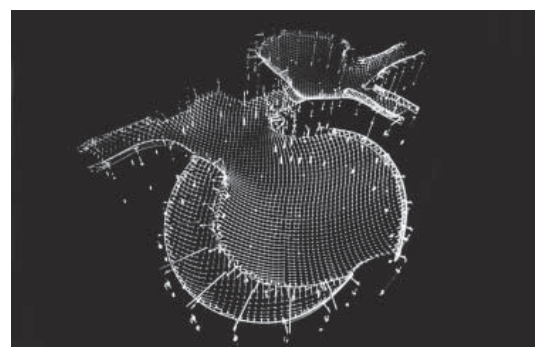
Metoda *Form Finding* kojarzona jest z nazwy od początku XX w. ale w praktyce znana i stosowana jest od dawna, chociażby przez Antoniego Gaudiego. Łańcuchowe modele, wspomagające sposób kształtowania niezwyklej budowli Gaudiego prezentują piękno logiki form strukturalnych. Niemniej jednak budowanie przestrzennych modeli fizycznych to trudne i pracochłonne zadanie. Przykładem wczesnego, analogowego zastosowania metody *form-finding* jest konstrukcja Multihalle, projektu Otto Frei, zrealizowana w 1975 w Mannheim w Niemczech (il. 2a, 2b, 2c). Obiekt został ukształtowany poprzez analogię do badań wytrzymałościowych opartych na modelu fizycznym wykonanym w skali 1:100. Analizę statyczną przeprowadzono w latach 70. XX wieku na podstawie metody pochodzącej z dziedziny *Form Finding*, opartej o *Nonlinear Force Density Method NFDM*. Ostateczna forma, jaką przybrał obiekt, została opracowana przez Klausa Linkwita i jego współpracowników, którzy do optymalizacji kształtu wykorzystali analizę stereograficzną.

Wykonany przez projektantów model przekrycia posłużył nie tylko do analizy statycznej, ale był także przydatny do usunięcia osobliwości (wygładzenia)

2a.



2b.



2c.

z powierzchni powłoki zewnętrznej całej struktury.¹² Scharakteryzowane powyżej zadanie to przykład efektywnej konstrukcji, która inspirowała projektantów wykorzystujących *Form Finding* współcześnie z użyciem cyfrowych modeli obliczeniowych. Z jednej strony interesujący w tym przykładzie jest sam proces modelowania i kształtowania konstrukcji, z drugiej wykorzystanie wiotkich listew drewnianych do budowy nośnej powłoki. To rozwiązanie wpisuje się w aktualne i ważne trendy architektury zrównoważonej. Obiekt Multihalle osiągnął rozpiętość przęsłową powyżej 60 m przy niewielkim ciężarze przekrycia – około 14 kg/m^2 ¹³.

Przykładem nowszej realizacji wykorzystującej *Form Finding* jest obiekt Centre Pompidou zrealizowany w Metz we Francji w 2010 r. Autorami projektu architektonicznego są Shigeru Ban oraz Jean de Gastines (il. 3a, 3b, 3c). Projekt konstrukcji powstał w biurze Ove Arupa przy udziale Hermana Blumera. Na uwagę zasługują w tym przykładzie zastosowane dwukrzywiznowe elementy z drewna klejonego wykorzystane do ukształtowania przekrycia o powierzchni ok. $8\,500 \text{ m}^2$ z rozpiętościami konstrukcyjnymi do 40 m¹⁴. Do metod wspomagających cyfrowy

2. Multihalle Mannheim, Niemcy, 1974; projektanci: Otto Frei, Carlfried Mutschler, Winfried Langner:

a) widok ogólny struktury z łukiem przęsłowym; b) widok w zbliżeniu na wygięte listewki struktury nośnej; c – „WOOD – building the future”, Multihalle Mannheim, www.wooddays.eu; b – fot. Daniel Lukac, www.mannheim-multihalle.de

2. Multihalle Mannheim, Germany, 1974; designers: Otto Frei, Carlfried Mutschler, Winfried Langner:

a) general view of the structure with a span arch; b) a close-up view of the curved lamellae of the support structure; c – mosquito net conceptual model. Source: a, c – „WOOD – building the future”, Multihalle Mannheim, www.wooddays.eu; b – photo by Daniel Lukac, www.mannheim-multihalle.de

¹² J.M. Songel, *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, "The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", Vol. XLIV-M-1-2020, s. 239.

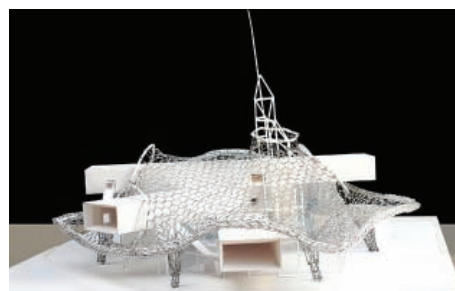
¹³ D. Wendland, *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, w: E. Torroja: *from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar*, Politecnico di Torino, red. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003.

¹⁴ T. Schwinn, *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016, s. 187–189.

3a.



3b.



3c.

3. Centre Pompidou- Metz, Francja 2010; Projektanci: Shigeru Ban i Jean de Gastines: a) widok na wygięte pręty struktury; b) inspiracja – chiński kapelusz tkany z bambusa; c) model fizyczny obiektu. Fot. Paul Raftery, źródło: W. Hunter, *Centre Pompidou-Metz by Shigeru Ban Architects & Jean de Gastines Architectes*, France, www.architectural-review.com
3. Center Pompidou-Metz, France 2010; Designers: Shigeru Ban and Jean de Gastines: a) view of the bent structural bars; b) inspiration – Chinese hat woven from bamboo; c) the physical model of the object. Photo Paul Raftery, source: W. Hunter, *Centre Pompidou-Metz by Shigeru Ban Architects & Jean de Gastines Architectes*, France, www.architectural-review.com

proces „wyłaniania się formy” (*Form Finding*) można zaliczyć wspomnianą wyżej metodę Geometric Stiffness (odmiany FDM – *Nonlinear Force Density method*) oraz metodę z rodziny *Dynamic Equilibrium*¹⁵ reprezentowaną przez metodę *Dynamicznej Relaksacji DR (Dynamic Relaxation)*¹⁶. Wspomagane komputerowo algorytmy stanowią nowoczesne narzędzie do poszukiwania formy, w której następuje równowaga sił dla odkształconego ustroju konstrukcyjnego. Dzięki tym analizom można ustalić wyjściową konfigurację elementów konstrukcyjnych (przed przyłożeniem oddziaływań występujących podczas eksploatacji obiektu), a także przeprowadzić analizę konstrukcji odkształconej po przyłożeniu obciążeń. Analizy z dziedziny *Form Finding* mają szczególne znaczenie w przypadku analiz elementów wiotkich, takich jak drewno konstrukcyjne. Wstępnie wygięte elementy konstrukcyjne listewek lub powłok z drewna klejonego przybierają kształty odpowiednie dla ich pracy. Przy niskim stosunkowo module Younga drewno jest materiałem podatnym na odkształcenia, a tym samym łatwo poddającym się wstępnym odkształceniom przy stosunkowo niskiej ilości energii niezbędnej do nadania pożądanej krzywizny.

Przykładem takiego działania (gdzie wykorzystano metodę Dynamicznej Relaksacji) jest The Downland Gridshell at the Weald and Downland Open Air Museum, projektu Edwarda Cullinana oraz inżynierów z Biuro Happold, zrealizowane w 2002 r. w Sussex w Wielkiej Brytanii. Struktura zbudowana z listewek wykonanych z drewna dębowego wyznacza trójkątne panele utworzone poprzez listewki biegnące w układzie diagonalnym w dwóch przeciwstawnych kierunkach oraz listewki biegnące w kierunku podłużnym. Podłużne listewki stanowią podkonstrukcję

¹⁵ D. Veenendaal, P. Block, *An overview and comparison of structural form finding methods for general networks*, “International Journal of Solids and Structures”, Vol. 49, 2012, Issue 26, s. 3741–3753.

¹⁶ D’Amico B et al., *Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, “Structures”, Vol. 3, 2015, s. 5.

dla powłoki zewnętrznej z tkaniny i jednocześnie stanowią stężenie konstrukcji tworząc trójkątne podziały siatki strukturalnej. Konstrukcja Downland Gridshell nie przykrywa tak imponujących rozpiętości jak Multihalle Mannheim bowiem rozpiętość przeszłowa osiągnęła 15.2 m, jednak stanowi ciekawy przykład zastosowania drewna konstrukcyjnego jako lekkiej konstrukcji strukturalnej wstępnie sprężonej poprzez nadanie jej elementom odpowiednich krzywizn¹⁷.

4. Automatyzacja produkcji

Dla współczesnych konstrukcji drewnianych ważnym aspektem jest proces automatyzacji – zarówno modelowania architektonicznego konstrukcyjnego, jak i procesu samej produkcji. Stosowanie robotów przy wytwarzaniu (fabrykacji) metodą subtraktywną lub addytywną jest coraz bardziej powszechne¹⁸. Metody subtraktywne charakteryzują się tym, że podczas procesu wytwarzania odejmowany jest materiał, który nie uczestniczy w pracy konstrukcji lub uczestniczy w sposób nieefektywny. Redukcję zbędnego materiału mogą prowadzić odpowiednio zaprogramowane maszyny (obrabiarki), które wycinają zbędny materiał odrzucony przez projektanta w procesie optymalizacji konstrukcji. Metoda addytywna zyskała bardzo dużą popularność w dobie drukarek 3d, które dodają pożądany materiał powiększając jego przekrój lub dokładając całe elementy. W odniesieniu do konstrukcji drewnianych metoda addytywna polega także na dodawaniu całych segmentów konstrukcji w postaci przygotowanych wcześniej prefabrykatów.

Przykładem zastosowania zdigitalizowanej fabrykacji może być realizacja z 2016 r. The Sequential Roof, przekrywającego nowy budynek Institute of Technology in Architecture uczelni ETH w Zurichu. Wytworzenie konstrukcji przekrycia zostało poprzedzone analizami sparametryzowanej geometrii konstrukcji. Sparametryzowanie geometrii dachu było pomocne przy optymalizacji kształtu konstrukcji w celu uzyskania oszczędności materiałowych przy doborze przekroju listewek, uproszczenia i maksymalnego ujednoczenia wzorów węzłów (połączeń), a także w zakresie dostosowania kształtu dachu do konfiguracji zastosowanych systemów instalacji świetlnej i przeciwpożarowej. Całkowicie zautomatyzowane metody wytwarzania zostały wykorzystane do prefabrykacji wszystkich elementów konstrukcji składającej się z 168 dźwigarów o rozpiętości 14.70 m. Uzyskano w ten sposób przekrycie o powierzchni 2 308m² ¹⁹. Proces wytwarzania i montażu przedstawiają fotografie 4a, 4b, 4c.

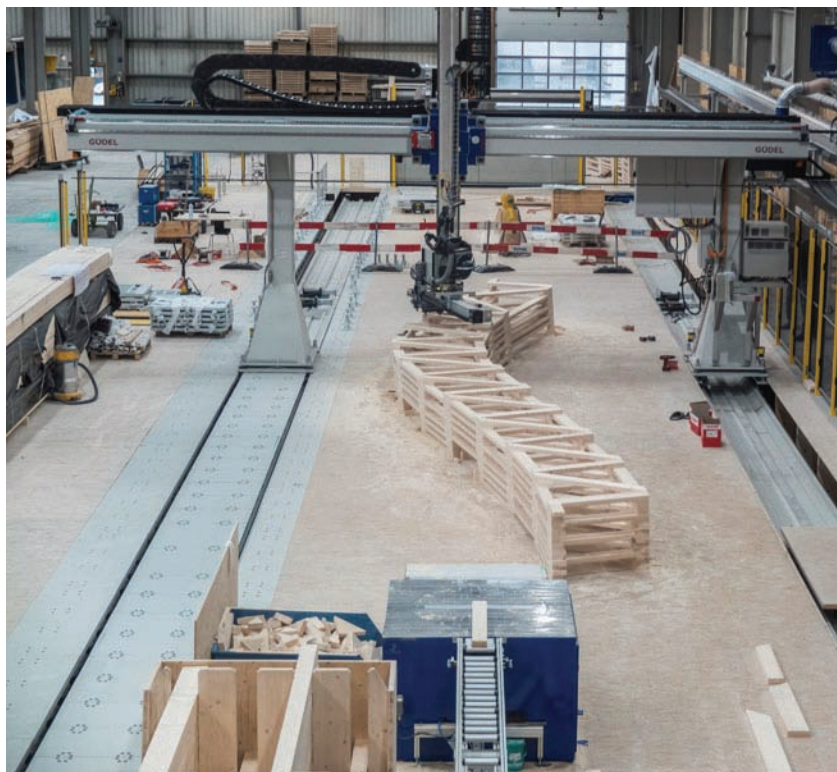
Interesujący przykład z dziedziny fabrykacji z wykorzystaniem drewna konstrukcyjnego stanowi również najnowsza realizacja Pawilonu livMatS w Ogrodzie Botanicznym we Fryburgu z 2021 r. zaprojektowana przez Achima Mensgesa (ICD, Uniwersytet w Stuttgarcie) oraz Jana Knippersa (ITKE, Uniwersytet w Stuttgarcie),

¹⁷ Downland Gridshell, <https://www.wealddown.co.uk/buildings/downland-gridshell/> (dostęp 30.11.2021).

¹⁸ E. Gawell, A. Stefańska, *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, nr 61(4), s. 82–92.

¹⁹ J. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, w: *Advancing Wood Architecture*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017, s. 24–26.

4a.



4b.



4c.

4. The Sequential Roof of the Institute of Technology in Architecture, ETH Zurich, Projekt: Arch-Tec-Lab AG Realizacja: ERNE AG Holzbau, 2016; a, c) automatyczna produkcja elementów struktury; b) montaż konstrukcji. Fot. Gramazio Kohler, www.ita.arch.ethz.ch

4. The Sequential Roof of the Institute of Technology in Architecture, ETH Zurich, Design: Arch-Tec-Lab AG Realizacja: ERNE AG Holzbau, 2016; a, c) automated production of structure elements; b) assembly of the structure. Photo by Gramazio Kohler, www.ita.arch.ethz.ch

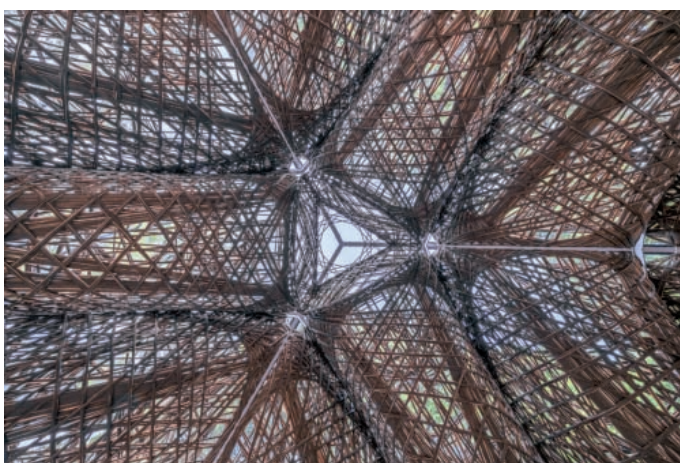
przy wsparciu Deutsche Bundesstiftung Umwelt, ExolonGroup²⁰. Struktura pawilonu była inspirowana budową kaktusa saguaro oraz opuncji figowej i wykorzystywała analogię do powłokowej budowy roślin, wzmocnionej przebiegającymi warstwowo włóknami. Jako budulec autorzy projektu wykorzystali włókna lniane, które w sposób zautomatyzowany były nawlekane na formy w postaci stalowych ramek. Po usunięciu form uzyskano powtarzalne moduły konstrukcyjne o charakterze membran uformowanych z prętów z włókien lnianych. Projekt konstrukcji wymagał badań podstawowych w zakresie wytrzymałości nietypowych materiałów. Przed realizacją badaniom poddano sprefabrykowane moduły konstrukcji. Pomimo tego, że obiekt jest stosunkowo niewielki (około 48 m² powierzchni), projektanci wykazali się bardzo dużą wiedzą z zakresu interdyscyplinarnego projektowania oraz wykorzystali zaawansowane techniki numeryczne. Proces realizacji obiektu był poprzedzony wnikliwymi studiami, w tym także badaniami doświadczalnymi użytego materiału pod kątem jego parametrów wytrzymałościowych. Kierunki układania włókien, gęstość włókien i ilość w poszczególnych warstwach były ściśle dostosowane do wyznaczonych numerycznie kierunków i wartości sił wewnętrznych. Projektowanie konstrukcyjne pawilonu zostało dostosowane do wymagań niemieckich norm projektowych, z uwzględnieniem klimatycznych oddziaływań normowych, i uwieńczone prefabrykacją modułów konstrukcyjnych całkowicie zrobotyzowaną i zrealizowaną sposobem addytywnej fabrykacji (il. 5 a, b, c, d).

²⁰ *livMatS Pavilion*, <https://www.icd.uni-stuttgart.de/projects/livMatS-Pavilion/> (dostęp 30.11.2021).

5a.



5b.



5c.

5d.

4. Dyskusja

Projektowanie architektoniczne to coraz częściej złożony proces wyłaniania się formy w wyniku cyfrowej obróbki związanej z modelowaniem, analizą i produkcją. Jest to m.in. wynik dynamicznego rozwoju techniczno-technologicznego, a także digitalizacji narzędzi projektowych i badawczych. Dalszy postęp w tym zakresie będzie dostarczał jednocześnie nowych możliwości i wyzwań konstrukcyjno-budowlanych.

Wielobranżowy charakter powstawania obiektów budowlanych nie jest niczym nowym i zaskakującym. Jednakże z uwagi na możliwości realizacyjne, jakich dostarczają technologie formatywne, proces ten może przebiegać bez udziału ludzi (maszyny samosterujące). Fabrykacja elementów konstrukcyjnych lub całych obiektów umożliwia wytwarzanie nieregularnych i złożonych form, a jednocześnie wymusza wykonanie wnikliwych symulacji strukturalnych poprzedzających etap realizacji. Odpowiedzią na tak rozwijające się tendencje we współczesnej architekturze jest idea „from file to factory”, odnosząca się do płynnego łączenia procesu projektowania z produkcją. Cechą charakterystyczną form przestrzennych, które powstają w wyniku takiego działania, jest wykorzystanie cyfrowych strategii projektowania i wytwarzania opartych na koncepcjach obliczeniowych. To sprawia, że nauki inżynierskie stają się istotnym elementem kreatywnych poszukiwań projektowych. W odniesieniu do omawianej tematyki wykorzystania drewna konstrukcyjnego w architekturze należy dodatkowo uwzględnić kilka istotnych zagadnień. Jednym z nich jest naturalność

5. livMatS w Ogrodzie Botanicznym we Fryburgu. Niemcy. Realizacja 2021, Projekt: Achim Menges (ICD / Uniwersytet w Stuttgarcie), Jan Knippers (ITKE / Uniwersytet w Stuttgarcie); a – widok struktury przekrycia; b – proces produkcji segmentu konstrukcyjnego; c – widok konstrukcji od spodu, d – widok ogólny pawilonu. Fot. ICD/ITKE/IntCDC University of Stuttgart, www.icd.uni-stuttgart.de
5. livMatS at the Freiburg Botanical Garden, Germany. Commissioned 2021, Design: Achim Menges (ICD / University of Stuttgart), Jan Knippers (ITKE / University of Stuttgart); a – view of the cover structure; b – construction segment production process; c – bottom view of the structure, d – general view of the pavilion. Photo credit ICD/ITKE/IntCDC University of Stuttgart, www.icd.uni-stuttgart.de

materiału, która z jednej strony stanowi niezaprzeczalną zaletę, a z drugiej wyzwanie inżynierskie w zakresie analiz konstrukcyjnych. Problem stanowi fakt, że surowiec jest wrażliwy na czynniki wzrostu, struktura każdego elementu jest inna, a cyfrowe bazy danych do obliczeń (zawierające przybliżone parametry wytrzymałościowe) nie zawsze są kompletne. W tym kontekście, współpraca pomiędzy projektantami, technologami itp. musi być podtrzymywana, rozwijana i wspomagana na poziomie badań podstawowych i wdrożeniowych.

5. Podsumowanie

Doskonalenie narzędzi modelowania form strukturalnych z drewna to niezbędne działanie w kształtowaniu optymalnych rozwiązań we współczesnej architekturze. Z jednej strony, podążając nurtem idei prośrodowiskowych, projektanci coraz częściej inspirowani są technologiami budowlanymi nacechowanymi niskoemisyjnością procesów obróbki materiału.

Z drugiej jednak istotne jest minimalizowanie strat energii wbudowanej w obiekt, wynikającej także z procesu jego eksploatacji. To wymusza rozwój i doskonalenie poznanych narzędzi do optymalnego kształtowania konstrukcji i elementów budowlanych. W ślad za tym obserwowany jest postęp w sektorze wykonawczym. Digitalizacja, a także robotyzacja procesów realizacyjnych inspirowane do kształtowania nie tylko coraz bardziej frapujących form, ale również innowacyjnych technologii materiałowych, efektywnie wykorzystujących naturalne właściwości drewna.

Wyżej wymienione zmiany, dynamicznie zachodzące we współczesnym budownictwie sprawiają, że coraz większego znaczenia nabiera współpraca na styku różnych dyscyplin biorących udział w procesie powstawania architektury. Nie chodzi tu jedynie o proces projektowania, który wyjściowo łączy elementy nauk technicznych i humanistycznych. Na szczególną uwagę zasługuje także sfera nauki i poprzedzone rozwojem badań podstawowych wdrażanie innowacyjnych rozwiązań dla budownictwa.

Bibliografia

- Abrahamsen R., Malo K., Bjertnæs M., *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building "Treet" in Norway*, "European Journal of Wood and Wood Products", Vol. 74, 01/05/2016
- Adiels E., Bencini N., Brandt-Olsen C., Fisher A., Näslund I., Kotani R., Poulsen E., Safari P., Williams C.J.K., *Design, fabrication and assembly of a geodesic gridshell in a student workshop*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- Bauer A. M., Längst P., La Magna R., Lienhard J., Piker D., Quinn G., Gengnagel C., Bletzinger K., *Exploring Software Approaches for the Design and Simulation of Bending Active Systems*, "Proceedings of the IASS Symposium 2018", red. C. Mueller, S. Adriaenssens, Boston 2018
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Timber gridshells: for general networks*, "International Journal of Solids and Structures", 2012, Vol. 49, Issue 26
- D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., *Numerical simulation, design and construction of a full scale structure*, "Structures", 2015, Vol. 3
- Gawell E., Nowak A., Rokicki W., *Searching for Bionics Structural Forms Optimization*, "IOP Conference Series: Materials Science and Engineering", 2019, nr 471

- Gawell E., *Optimal design of wooden pavilion gridshell structures in the context of architectural and structural collaboration*, w: *PROJECTIONS: Proceedings of the 26th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2021)*, red. A. Globa, J. van Ameijde, A. Fingrut, t. 1, Hong-Kong 2021
- Gawell E., Stefańska A., *Idea fabrykacji elementów strukturalnych w kształtowaniu współczesnych pawilonów*, „Zeszyty Naukowe Uczelni Vistula”, 2018, nr 61(4)
- Kotwica J., *Konstrukcje drewniane w budownictwie tradycyjnym*, Warszawa 2011
- Lienhard J., *Bending Active Structures. Form – finding strategies using elastic deformation in static and kinematic systems and the structural potentials therein*, Stuttgart 2014
- Nabaei S.S., Baverel O., Weinand Y., *Form-Finding of Interlaced Space Structures*. w: *11th World Congress on Computational Mechanics*, red. E. Onate, J. Oliver, A. Huerta, Barcelona 2014
- Nabei S., Baverel O., Weinand Y., *A hybrid simulation workflow for timber fabric structures*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Songel J. M., *Sustainability lessons from vernacular architecture in Frei Otto's work: tents and gridshells*, “The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences”, Vol. XLIV-M-1-2020
- Schwinn T., *Tobias Schwinn in conversation with Holzbau Amann and Müllerblaustein*, w: *Advancing Wood Architecture. A computational approach*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2016
- Veenendaal D., Block P., *An overview and comparison of structural form finding methods*, “International Journal of Solids and Structures”, 2012, Vol. 49, Issue 26
- Wagner H., *Flat sheet metal girders with very thin metal web, Part I, General theories and assumption*, Washington 1931, s. 200–207
- Wendland D., *Model-based form finding processes: Free forms in structural and architectural design*, w: *E. Torroja: from the philosophy of structures to the art and science of building: international Seminar, Politecnico di Torino*, red. F. Levi, M.A. Chiorino, C.B. Cesari, Milano 2003
- Willmann J., Gramazio F., Kohler M., *New paradigms of the automatic: robotic timber construction in architecture*, w: *Advancing Wood Architecture*, red. A. Menges, T. Schwinn, O.D. Krieg, New York 2017