

FORMA A KONSTRUKCJA MEBLI. MEBLE O KONSTRUKCJI WSPORNIKOWEJ

Agata Kozikowska

Wydział Architektury, Politechnika Białostocka, ul. Grunwaldzka 11/15, 15-893 Białystok
E-mail: a.kozikowska@pb.edu.pl

FORM AND STRUCTURE OF FURNITURE. CANTILEVER FURNITURE

Abstract

Furniture design is the domain of the architect and, like other fields of architecture, requires not only artistic background, but also an understanding of how a structure works. But the knowledge of the architect in structural analysis is often limited and he must be assisted by the construction engineer. The engineer usually does not interfere in the project at the initial stage of form shaping, only at the end, when the fundamental concept of work is already completed and is unlikely to be subject to greater changes. Therefore it is desirable for the architect to have the ability to analyze the behaviour of structures under specified loading so that he can exploit this knowledge in the conceptual phase. The aim of the article is to discuss the basic principles of structural analysis for furniture with statically determinate cantilever schemes and to present optimal shaping of furniture forms from different materials. This knowledge can help architects to gain structural experience, useful in furniture designing.

Streszczenie

Projektowanie mebli jest domeną architekta i tak jak inne dziedziny działalności architektonicznej, wymaga przygotowania nie tylko artystycznego, ale również znajomości pracy konstrukcji. Jednak architekt nie zawsze ma dostateczną wiedzę o analizie konstrukcji i musi korzystać z pomocy konstruktora. Konstruktor zwykle nie ingeruje w projekt na wstępnym etapie kształtowania form, jedynie na koniec, gdy zasadnicza koncepcja dzieła jest już ukończona i raczej nie podlega większym zmianom. Dlatego wskazane jest, aby architekt posiadał umiejętność analizy pracy ustroju nośnego pod określonymi obciążeniami, tak by mógł tę wiedzę wykorzystać już na etapie wstępnej koncepcji. Celem artykułu jest omówienie zasad pracy konstrukcji mebli o statycznie wyznaczalnych, wspornikowych schematach i przedstawienie optymalnego kształtowania ich form z różnych materiałów. Ta wiedza może pomóc architektom zdobyć doświadczenie konstrukcyjne, przydatne w projektowaniu mebli.

Keywords: furniture design, cantilevered curved-axis beam, live load, bending, full-stress design, structural forms

Słowa kluczowe: projektowanie mebli, belka wspornikowa o osi zakrzywionej, obciążenia użytkowe, zginanie, równomiernie wyciągnięta konstrukcja, formy strukturalne

WPROWADZENIE

W dawnych czasach ludzie, chcąc ułatwić sobie życie, stosowali różne przedmioty pełniące funkcje mebli. Później sami zaczęli projektować i wytwarzać meble. Formy mebli były dostosowywane do zmieniających się wymagań społecznych, były wyrazem nowych idei i nowatorskich rozwiązań ich projektantów. Projektowanie mebli stało się sztuką projektową, wchodzącą w skład architektury wnętrza.

Projektowanie mebli jest dziedziną działalności architektonicznej, która obok źródła twórczej inspiracji wymaga również wiedzy o pracy konstrukcji. Architektura nie może istnieć bez przestrzegania praw mechaniki. Konstrukcja jest i zawsze była istotnym składnikiem architektury. Jednak Siegel sugerował, że „architektura, łącząca w sobie dotychczas wiele dziedzin sztuki i techniki, stała się coraz

bardziej wyłączną domeną inżyniera, podczas gdy sztuce pozostały już tylko zadania dekoracyjne. Jednak wszystkie próby nadania architekturze na nowo cech artyzmu dopóty będą się kończyć niepowodzeniem, dopóki nie uda się włączyć techniki do procesu tworzenia form artystycznych”¹. Mówiąc o technice, miał na myśli konstrukcyjną budowę ustroju nośnego, bez której nie można urzeczywistnić żadnej budowlanej koncepcji i która jest decydującym technicznym czynnikiem kształtowania architektonicznego. Podkreślał, że architekt, który nie rozumie sensu konstrukcji, tworzy formy czysto dekoracyjne.²

Jednak Smardzewski zauważył, że „inżynierskie metody projektowania, bez których trudno sobie wyobrazić budownictwo, lotnictwo czy budowę maszyn, nigdy nie zostały systematycznie, ani na szeroką skalę wprowadzone w meblarstwie”³. Również Gustafsson twierdził, że projektowanie elementów konstrukcyjnych mebli prawie nigdy nie jest przedmiotem matematycznych rozważań⁴. Zamiast tego, projektant opiera się na doświadczeniu, tradycji i względach estetycznych. Dzieje się tak ze względu na specjalizację zadań projektowych i brak zadowalającej współpracy pomiędzy osobami wykonującymi te zadania. Dawniej architekt zajmował wyjątkową pozycję w procesie tworzenia obiektów architektonicznych: był artystą, projektantem, budowniczym. Dzisiaj różne funkcje, kiedyś powierzane jednemu człowiekowi, są pełnione przez różne osoby. Co najmniej dwoje ludzi wchodzi w skład zespołu projektowego: architekt i inżynier budowlany. Jednak Salvadori podkreślał, że dialog pomiędzy architektem i inżynierem może być utrudniony, gdyż wiedza inżyniera w dziedzinie socjologii, estetyki, planowania jest ograniczona, a architekt nie zawsze ma dostateczną wiedzę w zakresie nauk technicznych.⁵ Architekt i inżynier muszą więc dążyć za pomocą wszystkich środków, które są do ich dyspozycji, do wzajemnej i owocnej współpracy. Jednak to architekt jako szef konstrukcyjnego zespołu musi przewyciężyć trudności w porozumieniu z inżynierem, poprzez zrozumienie nie tylko podstawowych pojęć konstrukcyjnych, ale i głębszą wiedzę o analizie konstrukcji.

Wiedza o pracy konstrukcji jest kojarzona z głębokim matematycznym przygotowaniem, stosowaniem złożonych obliczeniowo metod analizy konstrukcji. Jednak nie zawsze jest to konieczne. Praca konstrukcji wielu mebli, nie tylko o statycznie wyznaczalnych schematach, jest możliwa do przeanalizowania w dosyć prosty sposób. Salvadori pisał, że intuicyjna wiedza o pracy konstrukcji nie musi być efektem złożonych obliczeń matematycznych, lecz powinna być oparta na dużym wcześniejszym doświadczeniu i powinna być ostrożnie weryfikowana i udoskonalana przez wykonanie doświadczeń.⁶ Bardzo dobrym narzędziem do tego są numeryczne metody analizy konstrukcji. Eckelmann i Suddarth⁷ jako pierwsi wykorzystali te metody do obliczeń konstrukcji mebli za pomocą pakietu programów w języku Fortran. Później Gustafsson^{8 9 10} stosował programy oparte na metodzie elementów skończonych w różnych etapach procesu projektowania mebli. Jednak Smardzewski wyraził pogląd, że „postępowanie się programami komputerowymi w rozwiązywaniu codziennych problemów konstruktorskich jest jednak uciążliwe i dość czasochłonne”¹¹, a Gustafsson podsumował, że meble rzadko są projektowane z wykorzystaniem komputerów.¹² Innym, prostszym sposobem nabywania doświadczenia konstrukcyjnego jest graficzna analiza pracy mebli o statycznie wyznaczalnych schematach (na przykład mebli wspornikowych), która charakteryzuje się dużą prostotą i poglądowością. Rozwijana w ten sposób intuicja pozwala projektować poprawne konstrukcyjne rozwiązania bez zbyt wielu matematycznych obliczeń.

Pierwsze próby łączenia nowoczesnej techniki inżynierskiej z architekturą zaczęły się pojawiać na przełomie XIX i XX wieku. Jednym z reprezentantów tego nurtu był belgijski architekt i projektant mebli Henry van de Velde. Szukał on piękna w formie konstrukcyjnej i postawił tezę, że „konstrukcja powinna sama z siebie, bez pomocy ornamentyki, rozwinąć własną, artystyczną formę wyrazu, ponieważ forma przedmiotu sama posiada już charakter ornamental-

¹ C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 7.

² Tamże.

³ J. Smardzewski, *Projektowanie mebli*, Poznań 2008, s. 170.

⁴ S. I. Gustafsson, *Furniture Design by use of the Finite Element Method*, Holz als Roh- und Werkstoff 1995.

⁵ M. Salvadori, *Structure in architecture: the building of buildings*, Englewood Cliffs 1975, s. 6.

⁶ Tamże, s. 398.

⁷ C.A. Eckelmann, S.K. Suddarth, *Analysis and design of furniture frames*, Wood Science and Technology 1969.

⁸ S. I. Gustafsson, *Furniture Design by use of the Finite Element Method*, Holz als Roh- und Werkstoff 1995.

⁹ Tenże, *Stability problems in optimized chairs?*, Wood Science and Technology 1996.

¹⁰ Tenże, *Optimizing ash wood chairs*, Wood Science and Technology 1997.

¹¹ J. Smardzewski, *Komputerowo zintegrowane wytwarzanie mebli*, Poznań 2007, s. 35.

¹² S. I. Gustafsson, *Stability problems in optimized chairs?*, Wood Science and Technology 1996.

ny”¹³. Następnie w europejskiej architekturze lat 20-tych i 30-tych XX wieku rozwinął się kierunek zwany konstruktywizmem. Charakteryzował się on podkreślaniem cech konstrukcyjnych obiektów, analizą właściwości użytych materiałów i zastosowanych układów konstrukcyjnych. O estetycznej wartości obiektu zaczęła decydować logicznie zastosowana i właściwie ustalona konstrukcja. Często kształt obiektu pochodził z przeniesienia wykresu momentów zginających na konstrukcję, tak aby przekroje elementów konstrukcyjnych i ilość zastosowanego materiału były jak najmniejsze. W 1919 roku powstała w Weimarze Wyższa Szkoła Artystyczna Bauhaus. Montenegro, charakteryzując szkołę, pisał, że Bauhaus starał się pogodzić sztukę z wiedzą rzemieślniczą i produkcją przemysłową, łącząc w osobie projektanta zarówno artystę kreującego formy, jak i specjalistę w zakresie materiałów oraz nowoczesnych technologii.¹⁴ Zgodnie z programem podstawowym celem szkoły było „wypracowanie prostych, rzeczowych i funkcjonalnych form architektonicznych, opartych na znajomości współczesnych materiałów budowlanych i rozwiązań konstrukcyjnych”¹⁵. W roku 1923 Bauhaus sformułował hasło „sztuka i technika - nową jednością”, co w procesie tworzenia owocowało „rzeczowością, daleko posuniętą zgodnością konstrukcji i funkcji oraz celowym użyciem materiałów”¹⁶. W ciągu 13 lat swojej działalności Bauhaus dążył wszelkimi środkami do uzyskania jasności form przedmiotów. „Punktem wyjścia do pracy kształtującej formy miało być »zbadanie istoty rzeczy«, należało uwzględnić wszystkie nowoczesne techniki wytwarzania, i konstrukcje, i materiały. Szukano najprostszyc, najbardziej celowych, »prawdziwych«, czy jak chętnie mówiono »czystych« form, pozbawionych wszelkich niepotrzebnych dodatków”¹⁷. „Architekci, tacy jak Le Corbusier i pracownicy naukowcy Bauhausu, wnieśli do architektury nowe, oparte na znajomości pracy konstrukcji (techniczne) pojęcie stylu.”¹⁸ W poświęconych meblom polskich publikacjach z lat 20-tych również był wi-

doczny wzrost zainteresowania kształtowaniem form mebli na podstawie nie tylko estetycznych reguł. W 1923 roku Jerzy Warchałowski pisał, że formy mebli powinny wynikać z „praktycznego celu, któremu mają służyć, materiału, z którego przedmiot jest zrobiony, z techniki, która przy wykonaniu jego była użyta”¹⁹. W drugiej połowie lat dwudziestych Lech Niemojewski atakował współczesne meble za nadmiar ornamentów, głosząc hasło „strzeżmy się przesady, stawiając formę ponad treść”²⁰.

Rozpoznanie obciążeń wynikających z funkcji mebli i zrozumienie pracy konstrukcji mebli pod działaniem tych obciążeń prowadzi do projektowania form, nie tylko pięknych wizualnie, ale i uzasadnionych konstrukcyjnie. Zespolecie wymagań praktycznych, praw statyki i możliwości konstrukcyjnych materiałów prowadzi do powstania harmonijnych i pięknych dzieł. Salvadori zwracał uwagę, że dostępność konstrukcyjnej wiedzy, uzyskana dzięki zastosowaniu matematyki, wytworzyła imponujące rezultaty i konstrukcje, które w przeszłości były tworzone przez architektonicznych geniuszy, teraz są rutynowo projektowane przez skromnych inżynierów. Sądził jednak, że demokratyzacja konstrukcyjnej wiedzy wprowadziła niebezpieczeństwo architektonicznych nadużyć przez praktyków, którzy nie posiadają solidnych podstaw wiedzy o konstrukcjach.²¹ Siegel twierdził, że „dociekanie podstawowych praw rządzących mechaniką sił, z których wyrastają prawdziwe i wyraziste struktury, nie ogranicza pomysłów twórczych, lecz przeciwnie - stanowi bodziec do wykrywania nowych form”²². Powoływał się na słowa Miesa van der Rohe „funkcja jest sztuką”²³, które interpretował jako dążenie do jedności sztuki i techniki w architekturze, a formy zrodzone z tej jedności nazwał „formami strukturalnymi”²⁴, przy czym słowo „struktura” rozumiał jako „układ zespolonych elementów rzeczy zbudowanej oraz związki zachodzące między tymi elementami”²⁵. Autor nie chciał używać terminu „forma konstrukcyjna”, który oznaczał według niego „przypadkowy

¹³ G. Kaesz, *Meble stylowe*, Wrocław 1990, s. 217.

¹⁴ R. Montenegro, *Meble*, Arkady, Warszawa 2001, s. 178.

¹⁵ C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 11.

¹⁶ S. Hinz, *Wnętrza mieszkalne i meble: od starożytności po współczesność*, Warszawa 1980, s. 53.

¹⁷ G. Kaesz, *Meble stylowe*, Wrocław 1990, s. 227.

¹⁸ C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 10.

¹⁹ A. Kostrzyńska-Miłosz, *Polskie meble 1918-1939, forma – funkcja – technika*, Warszawa 2005, s. 46.

²⁰ Tamże.

²¹ M. Salvadori, *Structure in architecture: the building of buildings*, Englewood Cliffs 1975, s. 398.

²² C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 138.

²³ Tamże, s. 7.

²⁴ Tamże, s. 7. Tłumaczenie z języka niemieckiego *Strukturformen* (tytuł oryginału *Strukturformen der modernen Architektur*) na język polski jako *formy strukturalne* może być mylące, gdyż w języku polskim *struktura* w znaczeniu konstrukcyjnym to regularna przestrzenna siatka prętów.

²⁵ Tamże, s. 7.

wygląd określonej konstrukcji”²⁶. W artykule termin „formy strukturalne” będzie również używany w znaczeniu, opisanym przez Siegela. Formy te nie powstają wyłącznie z natchnienia artystycznego i nie można ich traktować jak wzory graficzne, gdyż wynikają z rozkładu sił i pełnią funkcję nośną.

Chociaż według konstruktywistów i architektów Bauhausu względy ekonomiczne nie były decydującym czynnikiem doboru form obiektów, jednak odgrywały istotną rolę. Również Siegel twierdził, że „osiągnięcie maksymalnego efektu estetycznego, przy zastosowaniu jak najoszczędniejszych środków”²⁷ powinno być celem każdej działalności twórczej, a może to być osiągnięte dzięki „włączeniu praw techniki w zakres wartości estetycznych”²⁸. Realizacją tej idei są formy strukturalne – piękne i zarazem optymalne pod względem zużycia materiału. Poszukiwanie optymalnych form, szczególnie skomplikowanych konstrukcji, może być prowadzone z zastosowaniem różnych metod optymalizacji. Optymalne projektowanie konstrukcji mebli było przedmiotem prac Smardzewskiego²⁹ i Gustafssona³⁰. Chociaż według Smardzewskiego „niezależnie od rozwoju metod matematycznych i coraz powszechniejszego ich stosowania, konstruowanie pozostanie sztuką, a metody optymalizacyjne stanowią i stanowiąc będą jedynie skuteczne narzędzie pomocnicze”³¹.

Krzeseła są typem mebli, które zawsze „intrygowały artystów i architektów, stając się obiektem różnego rodzaju eksperymentów twórczych”³². Ich projektowanie dawało twórcom możliwość podsumowania ich wiedzy z różnych dziedzin, w tym także wiedzy technicznej. Dlatego tematem artykułu jest kształtowanie form sprzętów do siedzenia. Ze względu na olbrzymią ich różnorodność zostanie omówiona tylko ich pewna podgrupa: krzeseła o schemacie wspornikowym, których twórcami byli architekci Bauhausu. Analiza i kształtowanie form konstrukcyjnych tych mebli nie są trudne ze względu na ich statycznie wyznaczalne schematy statyczne. Ponadto są to meble szkieletowe, których konstrukcja zwykle nie jest zakryta jakimiś elementami osłonowymi i dlatego jest istotne, aby ich formy były nie tylko poprawne pod względem konstrukcyjnym i ekonomiczne, ale również estetyczne.

1. ZMIANA WYSOKOŚCI PRZEKROJU PRĘTA ZGINANEGO W JEDNEJ PŁASZCZYŹNIE MAKSYMALNIE WYŁĘŻONEGO

Konstrukcje mebli pod wpływem działających na nie obciążeń mogą być zginane w jednej lub dwóch płaszczyznach, ścinane w jednej lub dwóch płaszczyznach, skręcane, ściskane i rozciągane. W artykule rozważane będą meble, w których skręcanie nie występuje lub może być pominięte, gdyż zachowanie równowagi momentowej jest możliwe bez uwzględniania momentów skręcających. W takich sytuacjach zginanie ma decydujący wpływ na formę konstrukcji i wielkość przekroju i tylko nim będziemy się zajmować. Aby zużycie materiału i bezpośrednio związany z tym koszt konstrukcji był jak najmniejszy, zaprojektujemy konstrukcje zbudowane z prętów o stałej szerokości, ale o zmiennych wysokościach przekroju, dostosowanych do wykresów momentów zginających.

Sprawdzanie poziomu naprężeń zginających odbywa się za pomocą wzoru:

$$\sigma = M / W, \quad (1)$$

gdzie σ to maksymalne naprężenie przy zginaniu, M to moment zginający w przekroju, a W - wskaźnik wytrzymałości na zginanie, który w przypadku przekroju prostokątnego (np. przekrój drewniany) o stałej szerokości jest proporcjonalny do kwadratu wysokości przekroju h :

$$W = k_1 \cdot h^2, \quad (2)$$

zaś w przypadku przekroju dwuteowego (np. przekrój stalowy) o stałej szerokości, po pominięciu niewielkiej wytrzymałości cieńszego środka, jest proporcjonalny do wysokości h :

$$W = k_2 \cdot h. \quad (3)$$

Wielkości momentów w prostych prętach z równomiernym obciążeniem ciągłym zmieniają się wzdłuż długości pręta według funkcji kwadratowej:

$$M = k_3 \cdot x^2, \quad (4)$$

²⁶ Tamże, s. 8.

²⁷ C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 94.

²⁸ Tamże, s. 7.

²⁹ J. Smardzewski, *Numerical analysis of furniture constructions*, Wood Science and Technology 1998.

³⁰ S. I. Gustafsson, *Optimizing ash wood chairs*, Wood Science and Technology 1997.

³¹ J. Smardzewski, *Projektowanie mebli*, Poznań 2008, s. 389.

³² J. Charytonowicz, *Ewolucja form sprzętów do siedzenia od pradziejów do wieku maszyn*, Wrocław 2007, s. 396.

a w prętach nie obciążonych ta zależność jest liniowa:



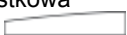

$$M = k_4 \cdot x, \quad (5)$$

gdzie k_1 , k_2 , k_3 i k_4 są stałymi mnożnikami, a x jest osiową współrzędną (miejszem położenia przekroju).

Konstrukcje maksymalnie wyęzione (konstrukcje o równej wytrzymałości) mają jednakowe maksymalne naprężenia w skrajnych włóknach równe dopuszczalnej wytrzymałości na zginanie R . Podstawiamy do równania (1) σ równe R oraz równania na M i W , dokonujemy prostych przekształceń i otrzymujemy przedstawione w tabeli 1 wzory opisujące zależność h od miejsca położenia przekroju x .

Pręty o równej wytrzymałości, o wysokościach zmieniających się według funkcji podanych w tabeli 1, w każdym przekroju mają naprężenia maksymalne równe wytrzymałości R . Jednak wykonanie pręta o wysokości przekroju zmieniającej się parabolicznie lub pierwiastkowo może być kosztowne. Dlatego wskazane jest wówczas uproszczenie formy pręta do formy liniowej z zachowaniem kierunku wzrostu przekroju. Taki pręt nie będzie wprawdzie równomiernie wyęzione, ale będzie bardziej oszczędny materiałowo niż pręt o stałym przekroju. Dobierając liniową formę zamiast kwadratowej, wystarczy dokonać liniowej interpolacji wysokości przekroju pomiędzy punktami końcowymi pręta (ryc. 1). Natomiast zamiana formy pierwiastkowej na liniową tą metodą daje nieprzekroczone wartości naprężeń tylko w przekrojach

Tabela 1. Zmiana wysokości przekroju równomiernie wyęzonego pręta zginanego o stałej szerokości przekroju w zależności od typu przekroju i obciążenia

Typ przekroju Obciążenie	Przekrój prostokątny	Przekrój dwuteowy
Równomierne obciążenie ciągłe	zmiennność liniowa $h = (k_3 / (k_1 \cdot R))^{1/2} \cdot x$ 	zmiennność kwadratowa $h = (k_3 / (k_2 \cdot R)) \cdot x^2$ 
Brak obciążenia	zmiennność pierwiastkowa $h = (k_4 / (k_1 \cdot R))^{1/2} \cdot x^{1/2}$ 	zmiennność liniowa $h = (k_4 / (k_2 \cdot R)) \cdot x$ 

Źródło: obliczenia własne.



Ryc. 1. Dobieranie liniowej formy przekroju dwuteowego pręta obciążonego ciągle. Rys. autorka



Ryc. 2. Dobieranie liniowej formy przekroju prostokątnego nieobciążonego pręta. Rys. autorka

skrajnych. Dlatego w tym przypadku należy przeprowadzić ekstrapolację na podstawie wysokości dwóch leżących blisko siebie przekrojów (ryc. 2).

Strukturalne formy mebli nie muszą się zmieniać ściśle według wytycznych dla prętów równej wytrzymałości, omówionych w tym punkcie. Indywidualna wizja projektanta, moda, koszt czy jakieś inne dodatkowe warunki mogą sugerować nieco odmienny kształt. Zawsze jednak formy te powinny charakteryzować się większymi wielkościami przekroju pręta w miejscach mocniej wyęzionych.

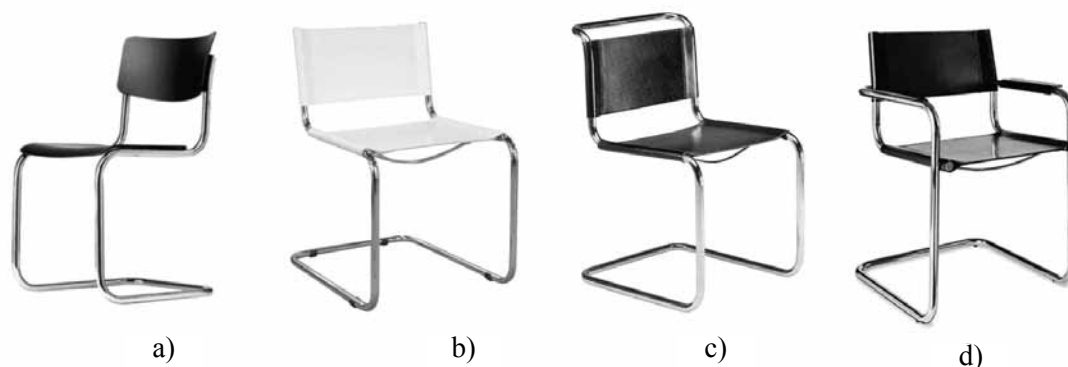
2. POCZĄTKI MEBLI WSPORNIKOWYCH

Pierwsze wykonane wspornikowe krzesło bez tylnych nóg, inaczej zwane krzesłem zawieszonym, zaprojektował holenderski architekt Bauhausu Mart Stam w 1926 roku (ryc. 3a). Równie znanymi projektantami takich krzesel byli inni architekci - Bauhausu Ludwig Mies van der Rohe i Marcel Breuer. Forma mebla była przedmiotem sporu o pierwszeństwo projektu, między innymi pomiędzy Stamem a Breuerem.^{33,34,35} Podobne „sprężynujące” krzesło z no-

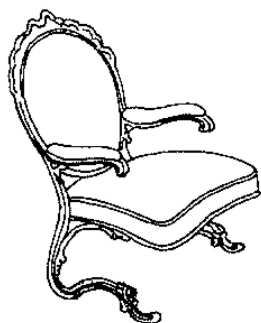
³³ I. Grzeluk, *Słownik terminologiczny mebli*, Warszawa 2000, s. 108.

³⁴ R. Montenegro, *Meble*, Arkady, Warszawa 2001, s. 179.

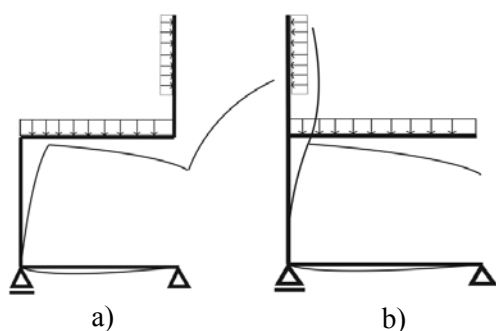
³⁵ V. Albus (i inni), (2009), *Modern furniture: 150 years of design*, Königswinter 2009, s. 633.



Ryc. 3. Krzesła wspornikowe zaprojektowane przez Marta Stama. Źródło: <http://www.mart-stam-furniture.com/>.



Ryc. 4. Krzesło „sprężynujące” zaprojektowane przez Ferdinanda Lista. Źródło: I. Grzeluk, *Słownik terminologiczny mebli*, Warszawa 2000, s. 113.



Ryc. 5. Schematy, obciążenia i linie ugięcia wspornikowych krzesel: a) krzesło bez tylnych nóg, b) krzesło bez przednich nóg. Rys. autorka.

gami umieszczonymi z tyłu (ryc. 4) zaprojektował już w 1852 roku Ferdinand List, ale nie mogło być wówczas zrealizowane ze względów technologicz-

nych.³⁶ Jednak krzesło wspornikowe pozbawione nóg tylnych jest lepsze niż pozbawione nóg przednich, ponieważ osoba siedząca na nim nie zsuwa się do przodu (ryc. 5).

3. ANALIZA PRACY I DOBÓR FORM STRUKTURALNYCH MEBLI WSPORNIKOWYCH

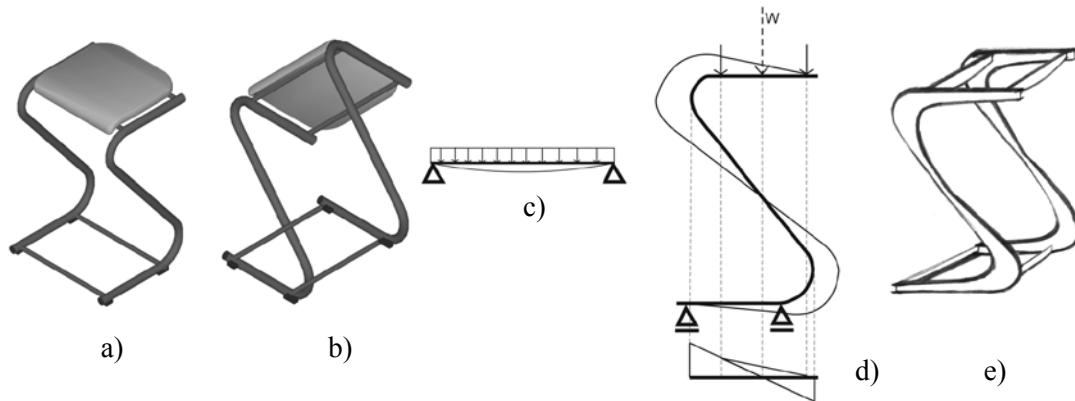
Siedziska i oparcia mebli, które będą przedstawione w artykule, są płytami zginanymi jednokierunkowo (walcowo), podpartymi na końcach na wspornikowych belkach o osi zakrzywionej. Sposób zmiany krzywizny wsporników może być nagły (jak w węzłach linii łamanej) lub stopniowy (jak w linii krzywej). Płyty mają schemat swobodnie podparty. Przekazują na podtrzymujące je pręty obciążenia użytkowe: większe w przypadku siedziska, mniejsze - oparcia. Obciążenia te są dużo większe niż ciężar własny konstrukcji i tylko je będziemy uwzględniać.

Wspornikowy stółek, przedstawiony na ryc. 6a i 6b, posiada siedzisko oparte na dwóch belkach poziomych. Belki te opierają się na wspornikowych belkach o osi zakrzywionej w płaszczyźnie pionowej w kształcie litery Z. Ze względu na zachowanie niezmienności geometrycznej konstrukcji połączenia belek poziomych z belkami wspornikowymi muszą być sztywne. Jednak momenty skręcające, które powstają w belkach wspornikowych w przypadku połączeń sztywnych, nie są konieczne do zachowania równowagi momentowej i mogą być pominięte. Dlatego możemy przyjąć, że połączenia te są przegubowe, a schemat belek poziomych jest swobodnie podparty. Momenty na belkach poziomych (ryc. 6c)

³⁶ I. Grzeluk, *Słownik terminologiczny mebli*, Warszawa 2000, s. 108.

są niewielkie. Najważniejszą częścią konstrukcji mebla są wspornikowe zakrzywione belki, utwierdzone w poziomych belkach opartych na dwóch podporach spoczywających na podłożu. Chociaż wspornik ma kształt zakrzywiony, to wykres momentów na nim jest taki sam jak dla wspornika prostego. Na górnej części bezpośrednio obciążonej siłami skupionymi wykres pochodzi od siły skrajnej, na dolnej części - od wypadkowej obu sił (ryc. 6d). Wykres momentów od każdego obciążenia rysujemy najpierw na prostym wsporniku pomocniczym prostopadłym do kierunku obciążenia (na rys. 6 obciążenia są pionowe, czyli pomocniczy wspornik jest poziomy). Następnie wykres przenosimy na zakrzywiony wspornik, zachowując te same wartości momentów wzdłuż linii równoległych

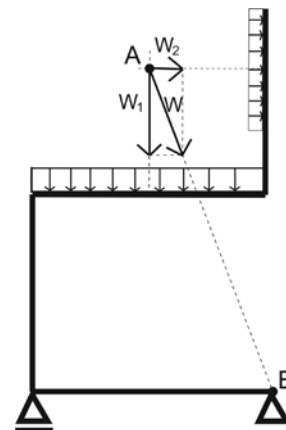
Krzesełko wspornikowe zaprojektowane przez Marcela Breuera w 1928 roku przedstawione jest na ryc. 8a i 8b. Schematem mebla jest wspornik o zakrzywionej osi, utwierdzony w poziomej swobodnie podpartej belce (ryc. 8c). Podpory tej belki umieszczone są na końcach prostego, poziomego pręta opierającego się na podłożu (niekiedy zwanego płozą), ponieważ taki sposób podparcia daje największe momenty zginające w poziomej belce. Pomocnicze wykresy momentów prostych wsporników są narysowane na ryc. 8c prostopadle do kierunków obciążeń: na dole - od obciążenia pionowego oraz po prawej stronie - od obciążenia poziomego. Wykres momentów od obciążenia poziomego jest parabolą pod obciążeniem ciągłym i linią prostą od wypadkowej tego obciążenia



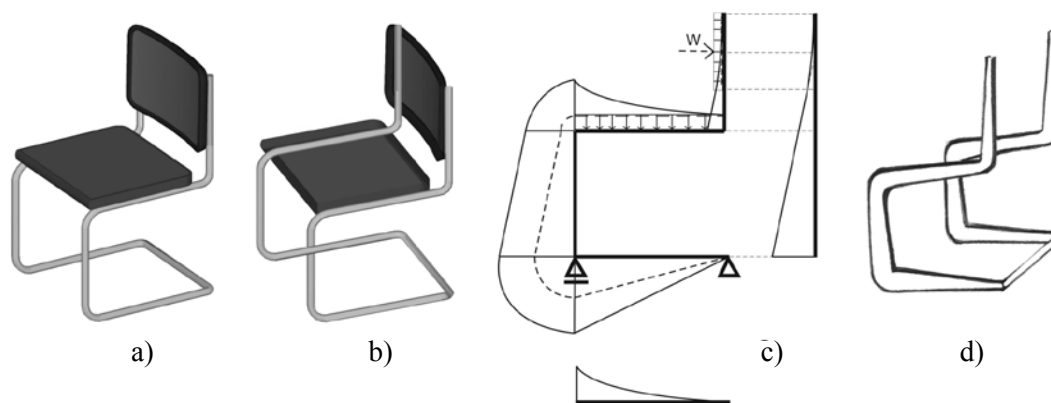
Ryc. 6. Stołek wspornikowy: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c) schemat, obciążenie i wykres momentów poziomej belki podtrzymującej siedzisko, d) schemat, obciążenie i wykres momentów wspornika, e) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji. Rys. autorka

do kierunku obciążenia (tu pionowych) i odnosząc je prostopadle do rzeczywistego zakrzywionego pręta. Poziome proste pręty na dole, łączące zakrzywione wsporniki, pełnią funkcję stężającą. Forma konstrukcji (ryc. 6e), nawiązująca do pracy konstrukcji, jest nie tylko oszczędna materiałowo, ale i dostarcza miłych wrażeń estetycznych.

W krzesłach, w których występuje boczne oparcie (np. ryc. 7), dobierając proporcje obciążeń od siedziska i oparcia, musimy pamiętać o zachowaniu równowagi obrotowej momentów. Moment utrzymujący krzesło w równowadze od wypadkowej obciążenia pionowego W_1 względem punktu B (moment przeciwdziałający obrotowi dookoła punktu B) nie może być mniejszy niż moment wywracający od wypadkowej obciążenia poziomego W_2 względem punktu B. Graniczne położenie linii wypadkowej W przechodzi przez punkt B (linia przerywana na ryc. 7).



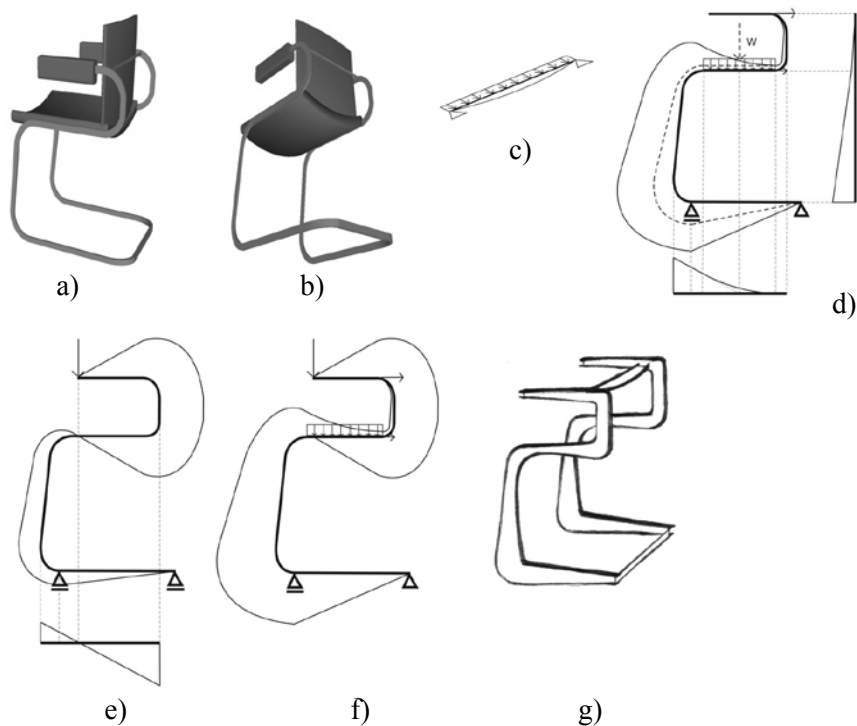
Ryc. 7. Sprawdzenie równowagi obrotowej krzesła z bocznym oparciem. Rys. autorka



Ryc. 8. Krzesło wspornikowe: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c) schemat, obciążenie i wykres momentów, d) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji. Rys. autorka

na części nieobciążonej. Oba obciążenia rozciągają tę samą stronę wspornikowej zakrzywionej belki i najniekorzystniejszy przypadek obciążenia występuje, gdy działają jednocześnie. Dlatego wykres momentów zakrzywionego wspornika jest narysowany na ryc. 8c jako suma obu wykresów momentów, przy czym linią

przerwaną są zaznaczone momenty pochodzące od obciążenia poziomego. Poziomy pręt, prostopadły do płaszczyzn zakrzywionych wsporników, łączący płyty na dole, nie pracuje pod działaniem podanych obciążeń, jedynie służy konstrukcję. W dostosowanej do wykresu momentów formie krzesła (ryc. 8d) wysokość



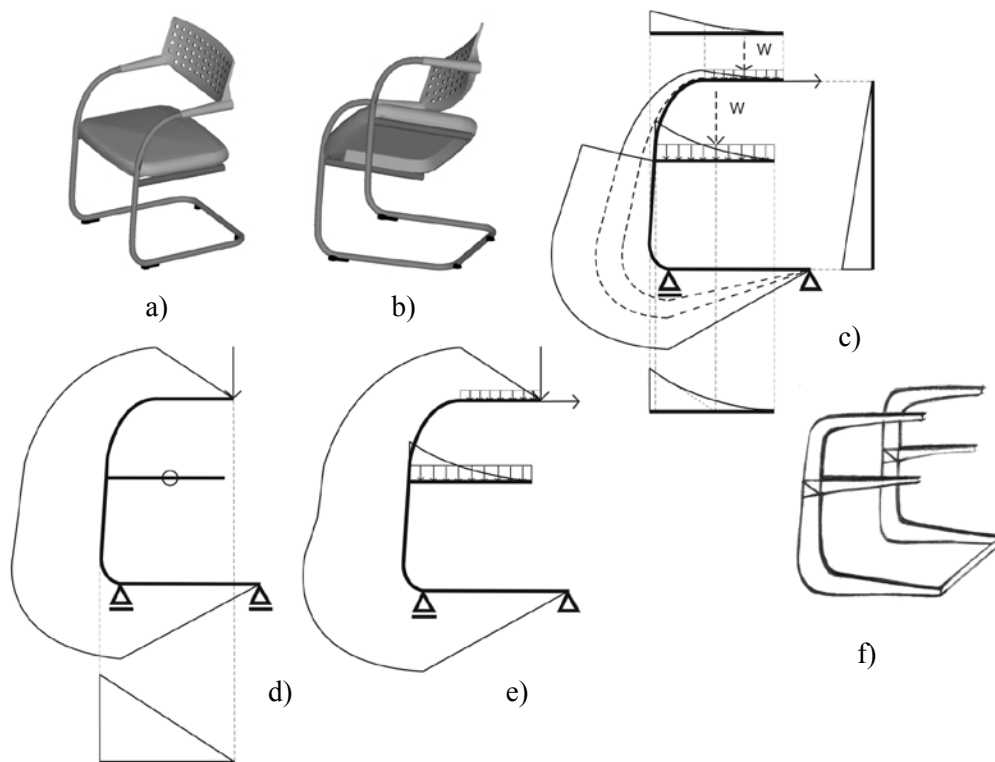
Ryc. 9. Krzesło wspornikowe: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c) schemat, obciążenie i wykres momentów poziomego pręta podtrzymującego oparcie, d-e) schemat, obciążenia i wykresy momentów wspornika, f) obwiednia momentów, g) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji. Rys. autorka

przekroju pręta stale rośnie od góry ku dołowi. Ta zależność występuje we wszystkich krzesłach wspornikowych, w których nogi są pionowe lub oddalają się od linii wypadkowej pionowego obciążenia, gdy zmierzają ku dołowi.

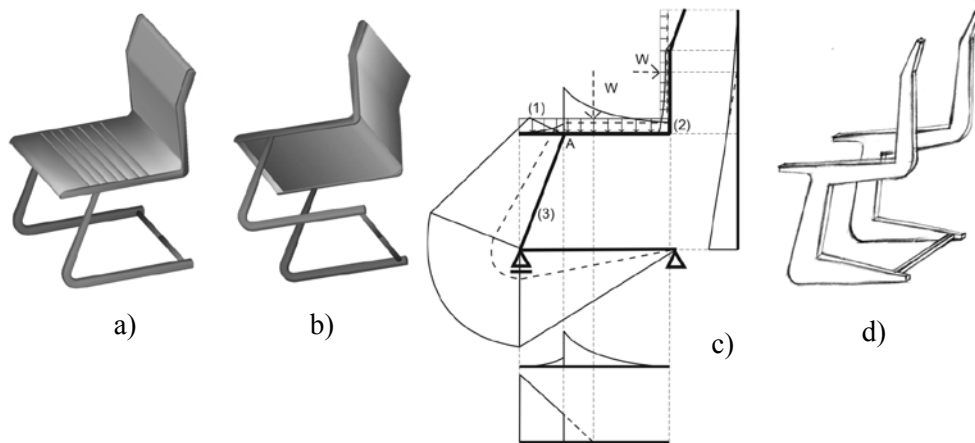
Krzesło z ryc. 9 o bocznych wspornikowych belkach w kształcie litery S musi mieć uwzględnione następujące obciążenia: poziome obciążenie od oparcia, działające na poziomy pręt jako obciążenie ciągłe (ryc. 9c) i dalej przekazywane na zakrzywiony wspornik jako dwie siły skupione (ryc. 9d), pionowe ciągłe obciążenia od siedziska (ryc. 9d) oraz pionowe obciążenie podłokietnika w postaci siły skupionej (ryc. 9e). Pomijamy skręcanie zakrzywionych wspornikowych belek przez poziomy pręt podtrzymujący oparcie (ryc. 9c), dlatego jego schemat przyjmujemy jako swobodnie podparty. Obciążenia przekazywane na wspornik od siedziska i oparcia działają jednocześnie i rozciągają wspornik po tej samej stronie, dlatego są uwzględnione łącznie (ryc. 9d). Najgorszym przypadkiem obciążenia podłokietnika jest pionowa siła skupiona na końcu (ryc. 9e), przekazywana w momencie wstawania z krzesła. Obciążenie to nie występuje łącznie z obciążeniem od siedziska i oparcia,

dlatego jest analizowane niezależnie od nich. Na ryc. 9f pokazana jest obwiednia wszystkich momentów działających na wspornik, na podstawie której została zaprojektowana forma konstrukcji o optymalnym ciężarze (ryc. 9g). Niewielkie pionowe obciążenie przekazywane na podłokietnik podczas opierania rąk, działające razem z obciążeniami z ryc. 9d, nie zostało uwzględnione, ponieważ nie wpływa na zmianę obwiedni.

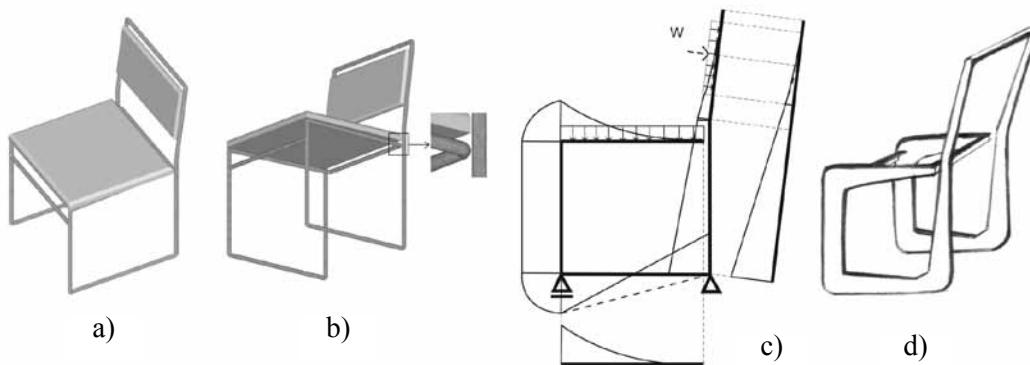
Osoba siedząca na krześle z ryc. 10 przekazuje obciążenia pionowe ciągłe na pręt podtrzymujący siedzisko i podłokietnik oraz poziome w postaci siły skupionej na podłokietnik, do którego przymocowane jest oparcie. Te wszystkie obciążenia mają momenty po tej samej stronie i suma tych momentów przedstawiona jest na ryc. 10c. Podczas opierania się na podłokietniku w momencie wstawania z krzesła na podłokietnik przekazywana jest pionowa siła skupiona. Najgorszy przypadek takiego obciążenia występuje, gdy siła ta jest na końcu wspornika, jak na ryc. 10d. Obwiednia momentów z ryc. 10c i 10d pokazana jest na ryc. 10e, a przykładowa forma dostosowana do tej obwiedni na ryc. 10f.



Ryc. 10. Krzesło wspornikowe: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c-d) schemat, obciążenia i wykresy momentów wspornika, e) obwiednia momentów, f) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji. Rys. autorka



Ryc. 11. Krzesło wspornikowe: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c) schemat, obciążenia i wykresy momentów wspornika, d) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji.
Rys. autorka



Ryc. 12. Krzesło wspornikowe: a-b) widok, źródło: <http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>, c) schemat, obciążenia i wykresy momentów wspornika, d) forma wynikowa z parametrów pracy konstrukcji.
Rys. autorka

Schemat statyczny krzesła z ryc. 11 jest rozgałęzionym wspornikiem, który składa się z trzech mniejszych wsporników:

(1) prostego wspornika poziomego utwierdzonego w węźle w punkcie A, podtrzymującego część siedziska;

(2) prawego zakrzywionego wspornika utwierdzonego w węźle w punkcie A, podtrzymującego część siedziska i oparcie;

(3) prostego wspornika utwierdzonego w swobodnie podpartej belce na dole, na którego końcu w punkcie A utwierdzone są wsporniki (1) i (2).

Wspornik (1) ma wykres momentów tylko od działającej na niego części pionowego obciążenia

przekazywanego przez siedzisko. Wykres momentów wspornika (2) jest sumą wykresów od pozostałej części obciążenia pionowego oraz od obciążenia poziomego. Wykres momentów wspornika (3) jest sumą momentów od obciążenia poziomego i wypadkowej całego obciążenia pionowego. W punkcie A spotykają się trzy różne wartości momentów, ale ich suma jest równa zero, gdyż spełniają warunek równowagi obrotowej.

W krześle na ryc. 12 siedzisko i oparcie opierają się na dwóch różnych wspornikach. Wsporniki te są utwierdzone z dwóch stron swobodnie podpartej belki, którą jest pozioma płoza opierająca się na podłożu. Obwiednię momentów tej swobodnie podpartej

belki tworzy na górze pręta linia ciągła momentu od obu obciążeń, zaś na dole linia przerywana momentu od pionowego obciążenia (gdy ktoś siedzi na siedzisku, ale nie opiera pleców). Trzy poziome pręty prostopadłe do dwuwspornikowej belki, łączące końce wsporników i pionowe pręty, pełnią funkcję stężającą.

PODSUMOWANIE

W artykule omówiona jest analiza pracy mebli wspornikowych pod wpływem działających na nie obciążeń użytkowych i pokazane kształtowanie ich optymalnych form. Ze względu na symetrię przestrzennych szkieletów tych mebli i symetrię obciążeń badanie pracy ich konstrukcji można sprowadzić do analizy bocznych belek wspornikowych o osi zakrzywionej, na których opiera się siedzisko i oparcie. Wsporniki te są zginane w bocznych płaszczyznach, a ich formy oszczędne materiałowo mają pręty o przekrojach wydłużonych w pionie, o wysokościach przekrojów stale zwiększających się od swobodnych końców prętów ku dołowi w krzesełach z nogami przednimi lub tylnymi. W krzesełach z nogami ukośnymi, biegnącymi z przodu do tyłu lub odwrotnie (jak np. w stołku z ryc. 6), stały wzrost wysokości przekrojów prętów ku dołowi występuje tylko w częściach podtrzymujących siedzisko i oparcie, nogi zaś są szersze na górze i na dole niż w części środkowej.

Zasady pracy konstrukcji tych mebli nie polegają na skomplikowanych matematycznych obliczeniach, lecz są podane w prosty, graficzny sposób. Daje to możliwość rozwijania intuicji konstrukcyjnej, która pomaga tworzyć nie tylko estetyczne formy mebli, ale również ekonomiczne i celowe.

LITERATURA

1. Albus V. (i inni), (2009), *Modern furniture: 150 years of design*, H.F. Ullman, Königswinter.
2. Charytonowicz J. (2007), *Ewolucja form sprzętów do siedzenia od pradziejów do wieku maszyn*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
3. Eckelmann C.A., Suddarth S.K. (1969), *Analysis and design of furniture frames*, Wood Science and Technology 3, 239-255.
4. Grzeluk I. (2000), *Słownik terminologiczny mebli*, PWN, Warszawa.
5. Gustafsson S. I. (1995), *Furniture Design by use of the Finite Element Method*, Holz als Roh- und Werkstoff 53, 257-260.
6. Gustafsson S. I. (1996), *Stability problems in optimized chairs?*, Wood Science and Technology 30, 339-345.
7. Gustafsson S. I. (1997), *Optimizing ash wood chairs*, Wood Science and Technology 31, 291-301.
8. Hinz S. (1980), *Wnętrza mieszkalne i meble: od starożytności po współczesność*, Arkady, Warszawa.
9. Kaesz G. (1990), *Meble stylowe*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich-Wydawnictwo, Wrocław.
10. Kostrzyńska-Miłosz A. (2005), *Polskie meble 1918-1939, forma - funkcja - technika*, Instytut Sztuki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa.
11. Montenegro R. (2001), *Meble*, Arkady, Warszawa.
12. Salvadori M. (1975), *Structure in architecture: the building of buildings*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
13. Siegel C. (1974), *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa.
14. Smardzewski J. (1998), *Numerical analysis of furniture constructions*, Wood Science and Technology 32, 273-286.
15. Smardzewski J. (2007), *Komputerowo zintegrowane wytwarzanie mebli*, PWRiL, Poznań.
16. Smardzewski J. (2008), *Projektowanie mebli*, PWRiL, Poznań.

Wykorzystane strony internetowe:

Google Galeria 3D -<http://sketchup.google.com/3dwarehouse/>

Mart Stam - Bauhaus Architect and Furniture Designer - <http://www.mart-stam-furniture.com/>

Artykuł zrealizowany w ramach pracy statutowej S/WA/5/07.