

FORMA A KONSTRUKCJA MEBLI. MEBLE O KONSTRUKCJI PŁYT ZGINANYCH JEDNOKIERUNKOWO

Agata Kozikowska

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

FORM AND STRUCTURE OF FURNITURE. FURNITURE AS PLATES IN CYLINDRICAL BENDING

Abstract

The article concerns shaping forms of furniture. The pieces of furniture are in the shape of thin plates curved in one direction and bent in the same direction. Different static schemes are considered and the most unfavourable loads are applied. Structural behaviour of these items of furniture is discussed and qualitative methods how to draw bending moment diagrams are presented. The material contained in the paper can be a source of inspiration for the design of variable thickness plates, which are optimal in terms of material consumption and satisfy the conditions of strength.

Streszczenie

Artykuł dotyczy kształtowania form mebli, które mają postać cienkich płyt zakrzywionych w jednym kierunku i zginanych w tym kierunku. Uwzględniono meble o różnych schematach statycznych pod działaniem najbardziej niekorzystnych obciążeń użytkowych. Dokonano omówienia pracy ich konstrukcji i przedstawiono metody jakościowego wykonywania wykresów momentów zginających. Materiał zawarty w artykule może być źródłem inspiracji do projektowania płyt tych mebli o zmiennej grubości, które nie wymagają wykorzystania dużych ilości materiału i spełniają warunki wytrzymałościowe.

Keywords: furniture design, plate in cylindrical bending, cantilevered curved-axis beam, simply supported beam, frame, structural forms

Słowa kluczowe: projektowanie mebli, płyta zginana walcowo, belka wspornikowa zakrzywiona, belka swobodnie podparta, rama, formy strukturalne

WPROWADZENIE

Projektowanie architektoniczne ma zawsze związek z projektowaniem konstrukcji. Jednak konieczność spełnienia wymagań odpowiedniej wytrzymałości i sztywności zwykle utrudnia architektom realizowanie ich wizji, jest ograniczeniem ich twórczych idei. Jednak tak być nie musi. Konstrukcja obiektu może być inspiracją twórczości architektonicznej. Projektowanie, którego celem jest uwypuklenie ujęcia wytrzymałościowego i dostosowanie form obiektów do pracy ich konstrukcji,

jest coraz częściej spotykanym nurtem działalności architektonicznej. Takie formy poza oczywistą korzyścią ekonomiczną, związaną z mniejszym zużyciem materiału, posiadają nowoczesny i oryginalny *design* oraz przyjemne dla oka walory estetyczne.

Wielu inżynierów i architektów zajmuje się tym tematem. Kaesz¹ pisze o kształtowaniu „czystych» form mebli na podstawie celowości konstrukcji, materiału i stosowanej techniki”. Siegel postuluje przyznanie ar-

¹ G. Kaesz, *Mebel stylowe*, Wrocław 1990, s. 228.

chitekturze jako sztuce miejsca w świecie techniki, bez wrogiego przeciwstawiania ich sobie, przy czym technikę utożsamia z konstrukcyjną budową ustroju nośnego. Uważa, że bez uwzględniania kryteriów naukowych nie można zrozumieć form architektonicznych, na które wywiera wpływ technika. Twierdzi, że „wiedza jako warunek zrozumienia świata form architektonicznych oznacza wprzęgnięcie rozumu w dziedzinę estetyki.”² Autor twierdzi, że „nowoczesna architektura opiera się na założeniach technicznych w większym stopniu niż kiedykolwiek w przeszłości, a pełne zrozumienie tych założeń nie jest możliwe bez właściwego opanowania konstrukcji”³. Jednak projektowanie form zainspirowanych pracą ustroju nośnego wymaga opanowania zasad mechaniki konstrukcji. Architekt nie musi być jednak specjalistą w zakresie konstrukcji i nie musi mieć wyczucia potencjału różnych form konstrukcyjnych, ponieważ może korzystać z rad inżyniera. Allen⁴ zauważa, że inżynierowie mogą pomóc architektom zrozumieć związek formy z jej właściwościami nośnymi i nauczyć ich, w jaki sposób można poprawić jakość projektu, wykorzystując uwarunkowania konstrukcyjne. Wielu autorów, między innymi Grater⁵, podkreśla, że inżynier powinien mieć wpływ na projekt od początku jego tworzenia, a nie otrzymać go na koniec, tylko w celu dokonania obliczeń. Problem ten porusza również Holgate⁶. Autor skarży się, że inżynierowie budowlani zbyt chętnie przyjmują pierwotną formę budynku, proponowaną przez architekta, i zajmują się tylko dobieraniem odpowiednich wymiarów elementów. Architekci natomiast oczekiwali od nich większego wkładu w fazie koncepcyjnej i takich propozycji modyfikacji formy, które są dopuszczalne konstrukcyjnie i jednocześnie mogą wzmocnić efekt dążeń projektanta. MacDonald⁷ stwierdza, że interakcja między konstrukcją a architekturą zależy przede wszystkim od tego, czy konstrukcja jest wyeksponowana czy zakryta. Jeśli konstrukcja nie jest widoczna, architekt może sam zająć się projektowaniem wstępnej formy dzieła, a następnie powierzyć inżynierowi jej zwymiarowanie. Natomiast w przypadku odsłoniętej konstrukcji inżynier powinien być członkiem zespołu projektantów i mieć wpływ na formę ustroju nośnego już od etapu początkowego.

Innym ważnym problemem utrudniającym projektowanie form opartych na pracy konstrukcji jest sposób kształcenia architektów w zakresie konstrukcji budowlanych, oparty na zdobywaniu przede wszystkim wiedzy ilościowej, a nie jakościowej. Architekt nie wykonuje szczegółowych obliczeń systemu nośnego i wiedza ilościowa nie jest mu niezbędna. Gdy natomiast posiada wiedzę jakościowego rozpoznawania pracy konstrukcji, może wykorzystywać ją przy doborze formy dzieła, i to już w najwcześniejszej fazie projektu. Problem ten porusza Allen. Autor⁸ pisze o potrzebie zapoznawania architektów z podejściem konstrukcyjnym, które dotyczy poprawy jakości projektów. Zauważa, że zarówno inżynierowie, jak i architekci otrzymują wykształcenie w zakresie analizy konstrukcji, natomiast ich wiedza o projektowaniu konstrukcji jest niewystarczająca. Podkreśla, że architekci, którzy chcą projektować wyjątkowe formy, muszą wznieść się ponad te ograniczenia. Torroja⁹ stwierdza, że obliczenia mogą służyć jedynie sprawdzaniu i poprawianiu elementów konstrukcyjnych, których kształt jest wynikiem twórczej intuicji projektanta. Jakościowe podejście do pracy konstrukcji jest również przedmiotem książki Mainstone'a¹⁰. Autor w bardzo przystępny sposób przedstawia analizę pracy ustroju nośnego.

Związek kształtu dzieł architektonicznych z pracą ich ustroju nośnego jest poruszany przez wielu autorów. Siegel¹¹ wprowadza pojęcie „form strukturalnych”, które są wynikiem kształtowania opartego na jedności funkcji, konstrukcji i formy. MacDonald¹² stwierdza, że docenienie roli konstrukcji jest niezbędne dla zrozumienia architektury. Jednak relacja między projektem konstrukcyjnym i projektem architektonicznym może przybierać różne formy. Z jednej strony jest możliwe praktyczne zignorowanie przez architekta uwarunkowań konstrukcyjnych podczas wymyślania formy budynku i całkowite ukrycie części nośnych. W takich przypadkach wpływ konstrukcyjnych rozważań na ostateczną formę jest minimalny. Z drugiej strony możliwe jest zaprojektowanie obiektu, który składa się przede wszystkim z elementów nośnych. Wówczas wymagania konstrukcyjne mają bardzo duży wpływ

² C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Warszawa 1974, s. 7.

³ Tamże, s. 11.

⁴ E. Allen i in., *Form and forces: designing efficient, expressive structures*, New Jersey 2010, s. 614.

⁵ A. Grater, *Interview with Ivan Margolius*, "Architectural Design" 2002, s. 126.

⁶ A. Holgate, *The art in structural design*, New York 1986.

⁷ A.J. MacDonald, *Structure and Architecture*, Oxford 2001, s. 114.

⁸ E. Allen i in., *op.cit.*, s. 612.

⁹ E. Torroja, *Philosophy of Structures*, Los Angeles 1958.

¹⁰ R. J. Mainstone, *Developments in structural form*, London 1983.

¹¹ C. Siegel, *op.cit.*, s. 151.

¹² A.J. MacDonald, *op.cit.*, s. xi-xii.

na zewnętrzną formę dzieła. Allen¹³ pisze, że architekci koncentrują się dzisiaj na tworzeniu oryginalnych, wyróżniających się kształtów, z których niewiele zasługuje na miano konstrukcji nośnych. Dążenie do wymyślenia coraz nowszych, niezwykłych form przysłania im wszelkie inne cele. W ten sposób powstają projekty, które reprezentują wizualny chaos i których koszt konstrukcji jest bardzo wysoki. Jeśli natomiast architekt tworzy projekt w oparciu o naturalny przepływ sił, wyniki mogą być wspaniałe. O aktywnej roli konstrukcji w architekturze pisze Charleson¹⁴. Kieruje słowa do architektów, którzy chcą poszerzyć swoją świadomość architektonicznego potencjału ustroju nośnego. Autor pragnie zmienić opinię, popularną wśród studentów architektury, że konstrukcja jest czysto technicznym elementem architektury. Podkreśla, że konstrukcja jest niezbędnym elementem, całkowicie zintegrowanym z architekturą, odgrywającym znaczącą rolę, angażującym zmysły, serca i umysły użytkowników obiektów architektury¹⁵. Charleson oprócz fizycznej roli konstrukcji dostrzega jej funkcjonalne i estetyczne możliwości. Uważa, że struktura nośna nie musi być „niema” w sensie architektonicznym, chyba że taki jest wybór projektantów. Autor podaje wiele przykładów konstrukcji „przemawiających” w sensie architektonicznym, które nie osłabiają, lecz wzmacniają pomysły architektoniczne. Takie konstrukcje przyczyniają się do zwiększania wartości projektu, stają się nawet najbardziej znaczącą jego częścią¹⁶.

Źródłem inspiracji do projektowania form architektonicznych powiązanych z pracą konstrukcji może być przyroda. Tworzenie form, powstających w naturze, polega na eliminowaniu materiału z obszarów mniej wyťažonych bez utraty nośności całej konstrukcji. Jak pisze Margolius¹⁷, wrodzona prostota natury przeniesiona do projektowania konstrukcji prowadzi to tworzenia eleganckich form.

Istotnym czynnikiem wpływającym na ocenę form architektonicznych jest ich estetyka. Ocenianie dzieł architektury powinno odbywać się na podstawie

zarówno poprawności konstrukcyjnej, jak i efektu wizualnego. Jednak nie istnieje bezpośrednia zależność pomiędzy spełnieniem wymagań wytrzymałościowych i estetyką. Salvadori twierdzi, że „poprawność konstrukcji jest na ogół warunkiem koniecznym piękna, ale nie jest warunkiem wystarczającym”¹⁸. Sebestyen i Pollington¹⁹ uważają, że jeśli projektowanie konstrukcji prowadzi do formy, która jest wątpliwa pod względem estetyki, to proces projektowania nie został pomyślnie zakończony. Merkel²⁰ pisze o meblach jako architektonicznych konstrukcjach. Twierdzi, że lepszy sens konstrukcyjny prowadzi do większego poczucia estetyki. Charleson²¹ zauważa, że wszędzie tam, gdzie konstrukcja ma wpływ na architekturę, inny niż tylko w podstawowym znaczeniu, związanym z przeniesieniem obciążeń, przyczynia się to do estetycznego i funkcjonalnego bogactwa projektu. Margolius²² twierdzi, że związek między sztuką a technologią jest nieodwracalny, przy czym technologia może mieć własne, naturalne piękno, natomiast odwrotne twierdzenie już nie jest prawdziwe: sztuka nie posiada technicznego wymiaru. Allen²³ stwierdza, że konstrukcje nie są sztuką, istnieją w celu zaspokojenia ludzkich potrzeb. Ale nadal mogą być eleganckie, a nawet piękne. Nie dlatego, że ich kształt przypomina formy natury. Kryteria piękna na przykład kwiatów nie są takie same, jak kryteria odnośnie do konstrukcji. Autor pisze, że konstrukcje muszą znaleźć własne naturalne formy, które wynikają z sił wewnętrznych w nich występujących. Torroja²⁴ głosi pogląd, że naturalna forma jest najlepszym rozwiązaniem spełniającym wymagania i technika, i artyści. MacDonald²⁵ uważa, że kształty powstałe w oparciu o czysto techniczne względy mogą być uważane za dzieła sztuki, przy czym szczególnie ci, którzy posiadają techniczną wiedzę, są w stanie docenić ich piękno. Holgate²⁶ pisze, że niektórzy inżynierowie myślą o wyglądzie ich konstrukcji, jednak wielu uważa dobrą estetykę ustroju nośnego za kosztowny luksus. Jednak jako wynik współpracy pomiędzy architektami i inżynierami często są tworzone ekscytujące lekkie kon-

¹³ E. Allen i in., *op.cit.*, s. 612-613.

¹⁴ A. W. Charleson, *Structure as architecture : a source book for architects and structural engineers*, Amsterdam 2005, s. vii.

¹⁵ Tamże, s. vii.

¹⁶ Tamże, s. 2.

¹⁷ I. Margolius, *Architects + engineers = structures*, Chichester 2002, s. 7-8.

¹⁸ M. Salvadori, *Structure in architecture: the building of buildings*, Englewood Cliffs 1975, s. 5.

¹⁹ G. Sebestyen, C. Pollington, *New Architecture and Technology*, Oxford 2003, s. 140.

²⁰ J. Merkel, *Ali Tayar: Furniture as Structure*, "Architectural Design" 72, s. 81-83, 2002.

²¹ A. W. Charleson, *op.cit.*, s. vii.

²² I. Margolius, *op.cit.*, s. 7.

²³ E. Allen i in., *op. cit.*, s. 612.

²⁴ E. Torroja, *Logik der Form*, München 1961, s. 6.

²⁵ A.J. Macdonald, *op. cit.*, s. 101.

²⁶ A. Holgate, *op. cit.*, rozdz. 6.

strukcje, których formy nie zostały jeszcze uwzględnione w literaturze dotyczącej estetyki architektonicznej²⁷. Nervi²⁸ zastanawia się, czy trend polegający na ścisłym związku twórczości architektonicznej z prawami fizyki nie będzie prowadzić do monotonii. Jednak ostatecznie stwierdza, że taki pesymizm nie jest uzasadniony, gdyż oprócz wymagań technicznych każda twórczość ma zawsze pewien margines swobody, wystarczający, aby umożliwić twórcy wyrażenie własnej osobowości i spowodować, że projekt stanie się prawdziwym dziełem sztuki, nawet przy restrykcyjnych wymaganiach technicznych.

Ważnym aspektem projektowania form jest efektywność projektu. Allen²⁹ definiuje projektowanie konstrukcji jako łączenie wiedzy z intuicją, doświadczenia z fantazją i dążenia do wynalezienia efektywnej konstrukcji o unikalnej formie. Uważa, że znalezienie dobrej formy ustroju nośnego powinno być głównym problemem architekta i inżyniera. Sugeruje, że można uzyskać poprawę wydajności elementów budowlanych przede wszystkim poprzez poprawę ich kształtów, a inwestycja w dodatkowy czas projektowania może prowadzić do znacznie mniej kosztownych projektów. Również MacDonald³⁰ omawia wpływ formy konstrukcyjnej na wydajność projektu. Poleca zwiększenie efektywności poprzez właściwy rozkład materiału w przekroju i profilu podłużnym: poprzez usuwanie materiału z miejsc mniej wyťažonych, a dodawanie w miejscach o większych naprężeniach³¹. Efektywność materiałowa jest tym wyższa, im stosunek wytrzymałości do ciężaru jest wyższy, przy czym poziom efektywności, który jest osiąganym, powinien być dostosowany do indywidualnych warunków konstrukcyjnych. Jednak konstrukcja najbardziej efektywna, która zapewnia wymaganą nośność przy minimalnym zużyciu materiału, niekoniecznie jest najlepsza. Kilka innych czynników technicznych, w tym złożoność procesu wykonania i późniejsza trwałość konstrukcji, też wpływa na tę ocenę. Często wymagania techniczne są sprzeczne. Wydajne formy są zwykle złożone i dlatego trudne do projektowania, wykonania i utrzymania. Ten rozdźwięk pomiędzy efektywnością i prostotą formy to podstawowy aspekt projektowania konstrukcji. Ostateczna geometria jest zawsze kompromisem między tymi cechami a elegancją, z jaką ten kompromis jest osiągnięty, jest

jednym z głównych kryteriów dobrego projektowania konstrukcji.

W meblach płytowych, które będą analizowane w artykule, występuje zginanie, ścinanie, ściskanie i rozciąganie. W cienkich płytach - a takie będą płyty rozważanych mebli - zginanie dominuje i ma decydujący wpływ na formę konstrukcji i wielkość jej przekroju. Dlatego będziemy uwzględniać tylko zginanie. W płytach zginanych walcowo, oprócz naprężeń w płaszczyźnie zginania, powstają także naprężenia w płaszczyźnie prostopadłej, wywołane tzw. efektem Poissona. Naprężenia te są jednak wyraźnie mniejsze i nie muszą być brane pod uwagę przy doborze formy płyt. Zakładamy, że obciążenia użytkowe mebli znacznie przewyższają ich ciężar własny, dlatego ciężar ten będziemy pomijać. Płyty mebli mają kształt powierzchni walcowej, czyli powierzchni prostokreśnej, utworzonej przez prostą, tzw. tworzącą, przesuwającą się równolegle wzdłuż krzywej płaskiej, zwanej kierownicą. Płyty są oparte wzdłuż linii prostych równoległych do tworzącej. Po przyłożeniu obciążenia, takiego samego dla każdego pasma o kształcie kierownicy, płyty zginają się w jednym kierunku i nadal mają kształt powierzchni walcowej, ale takiej, której kierownica uległa wygięciu. Płyty są zgięte (pofalowane) przez obciążenie w jednym kierunku i zachowują się jak ułożone obok siebie i identycznie zginane w płaszczyznach pionowych belki o osi zakrzywionej lub ramy. Schematy takich płyt są zakrzywionymi belkami lub ramami o kształcie kierownicy.

Projektowanie konstrukcji wymaga sprawdzenia warunku wytrzymałości (zdolności do przenoszenia obciążeń), warunku zachowania sztywności (podatności na odkształcenia) i uwzględnienia możliwości wykonawczych. Na ograniczenie ugięć mają wpływ głównie czynniki psychologiczne, gdyż duże przemieszczenia wpływają negatywnie na samopoczucie ludzi znajdujących się wewnątrz budynku. Ten efekt jest szczególnie widoczny w obiektach o dużych rozpiętościach. W przypadku mebli nadmierne ugięcia nie są tak negatywnie odbierane, dlatego wymogi użytkowe nie muszą tu być uwzględniane. Możliwości kształtowania mebli są uzależnione od rodzaju użytego materiału. Wykonanie mebli o zmieniających się grubościach płyt może być kosztowne i utrudnione, jeśli zostaną zastosowane takie materiały, jak na przykład sklejka.

²⁷ A. Holgate, *Aesthetics of built form*, New York 1992, rozdz. 1.

²⁸ P. L. Nervi, *Aesthetics and Technology in Building*, Cambridge, MA 1965, s. 187.

²⁹ E. Allen i in., op. cit., s. 612-614.

³⁰ A.J. MacDonald, op. cit., s. 37.

³¹ Tamże, s. 40.

Natomiast produkcja mebli z tworzyw sztucznych, nawet o najbardziej nietypowych kształtach przekrojów, nie stwarza już takich problemów. Jednak produkcja ta jest opłacalna dopiero przy dużej liczbie wyrobów. Dzisiaj dostępne są już nowe rozwiązania techniczne, dla których zróżnicowanie formy nie jest problemem wykonawczym i nie podwyższa kosztów produkcji. Dodatkowo cena nie jest uzależniona od liczby produkowanych wyrobów i dzięki temu możliwe jest wytwarzanie nawet pojedynczych unikatowych egzemplarzy. Taką technologią jest drukowanie 3D. Polega ono na tworzeniu przedmiotu, wcześniej zaprojektowanego na komputerze, z cienkich warstw tworzywa, układanych jedna na drugiej. Wybór materiałów, które mogą być użyte do produkcji mebli za pomocą drukarki 3D, jest bardzo szeroki i ciągle się powiększa. W tej technologii wykonywano już meble między innymi z plastiku, żywicy, amalgamatu drewna, włókien węglowych, metalu³². Zważywszy na to, że sztywność omawianych mebli i koszt ich wytwarzania nie muszą być uwzględniane w trakcie ich projektowania, będziemy brali pod uwagę tylko warunek nieprzekroczenia dopuszczalnych naprężeń zginających, sprowadzony do analizy bezwzględnie maksymalnego momentu zginającego.

Zagadnienia kształtowania form mebli w oparciu o znajomość pracy ich ustroju nośnego były poruszane przez autorkę w artykułach o meblach wspornikowych³³ i meblach o schematach swobodnie podpartych belek i ramowych³⁴.

ANALIZA PRACY I DOBÓR FORM STRUKTURALNYCH MEBLI

Na rycinie 1 przedstawione jest „wijące się” krzesło wspornikowe, zaprojektowane przez amerykańskiego architekta Franka Gehry'ego. Prętowy schemat krzesła jest wspornikiem o osi zakrzywionej, utwierdzonym w swobodnie podpartej belce, z podporami w miejscach zetknięcia się płyty z podłożem. Na rycinie 1b widzimy wykres momentów wspornika od obciążenia ciągłego na części krzesła. Przypadek ten odpowiada sytuacji, gdy osoba siedząca przekazuje cały ciężar w taki sposób, że moment po przeciwnej stronie jest możliwie największy, a krzesło nie przewraca się do przodu. Gdyby kierunek wypadkowej W_1 przebiegał poza podporami, krzesło przewróciłoby się. Obrót do przodu nie zachodzi, ponieważ linia wypadkowej przechodzi przez

podporę. Na nieobciążonym oparciu i na nieobciążonej części siedziska nie ma momentu zginającego. Na odcinku bezpośrednio obciążonym ciągle wykres jest parabolą z wartościami rosnącymi od strony pręta ze swobodnym końcem. Na pozostałej części zginanie powoduje wypadkowa obciążenia ciągłego. Wykres momentów został narysowany na dole na linii poziomej i następnie przeniesiony na zakrzywiony pręt. Największe zginanie występuje w miejscach najbardziej odległych od linii wypadkowej, na skrajnej lewej części zawiniętego pręta podpierającego siedzisko. Wykres momentów na rycinie 1c odpowiada sytuacji, gdy użytkownik siedzi na jak największej części siedziska, zaś na rycinie 1d, gdy siedzi na siedzisku i dodatkowo opiera plecy na oparciu. Wypadkowa obciążenia pionowego W_1 i wykresy momentów od tej wypadkowej są w obu przypadkach takie same. Wielkość wypadkowej obciążenia poziomego W_2 na rycinie 1d została dobrana tak, aby krzesło nie wywracało się do tyłu. Warunek ten jest spełniony, gdy kierunek wypadkowej obu obciążeń W nie wychodzi poza lewą podporę, a w sytuacji granicznej, gdy przechodzi przez tę podporę³⁵. Pokazana na rycinie 1f zmienna grubość płyty jest dostosowana do obwiedni momentów z ryciny 1e. Płyta ta ma największą wysokość przekroju w zawinięciach, najbardziej wysuniętych z obu stron.

Na rycinie 2 pokazana jest ławka, której autorem jest meksykański projektant mebli Joel Escalona. Schemat ławki jest dwuwspornikową belką, której wsporniki są utwierdzone w swobodnie podpartej belce o kształcie odwróconej litery V, jak pokazano na rycinie 2b. Na rycinie 2c widzimy wykres momentów od ciężaru osoby siedzącej na części siedziska. Maksymalne wartości momentów występują, gdy wypadkowa obciążenia jest przesunięta możliwie jak najbardziej na lewo, ale jej kierunek nie wychodzi poza lewą podporę. Rycina 1d uwzględnia obciążenie przekazywane tylko na siedzisko i łączne obciążenie siedziska i oparcia, z kierunkiem wypadkowej obu obciążeń przechodzącym przez prawą podporę. Taki kierunek gwarantuje zachowanie równowagi obrotowej³⁶. Obciążenie tylko na siedzisku powoduje powstanie momentu zginającego na lewym wsporniku i na dole części między podporami. Oba obciążenia zginają wsporniki, na które działają, oraz pręt pomiędzy podporami, przy czym moment na części pomiędzy wspornikami jest na linii poziomej prostą

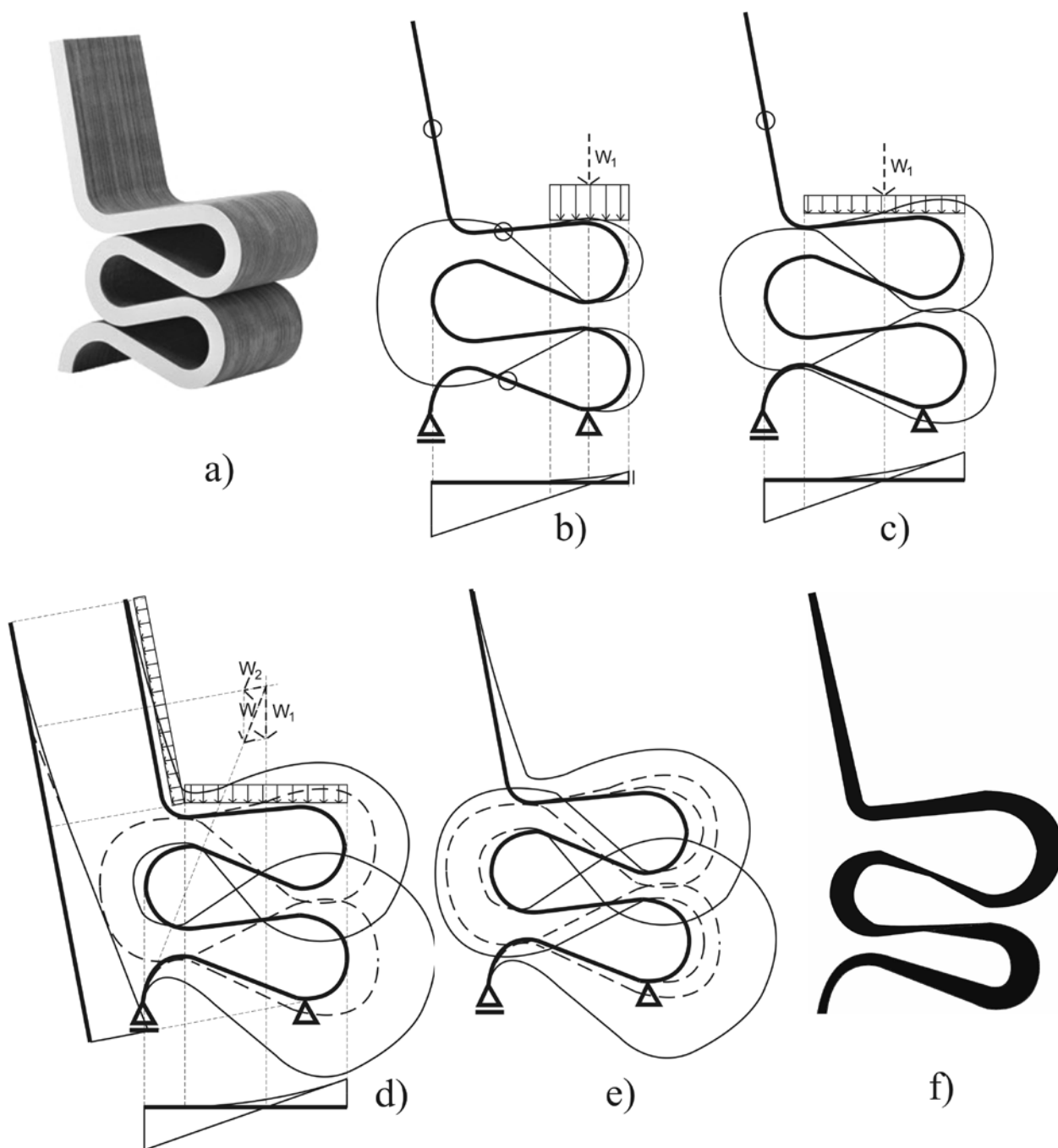
³² <http://platine.pl/drukarka-3d-tworzy-sofy-z-zywicy-0-1250843.html>.

³³ A. Kozikowska, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus” nr 4/2010.

³⁴ A. Kozikowska, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus” nr 4/2010.

³⁵ A. Kozikowska, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus”, nr 4/2010, s. 51.

³⁶ Tamże, s. 51.

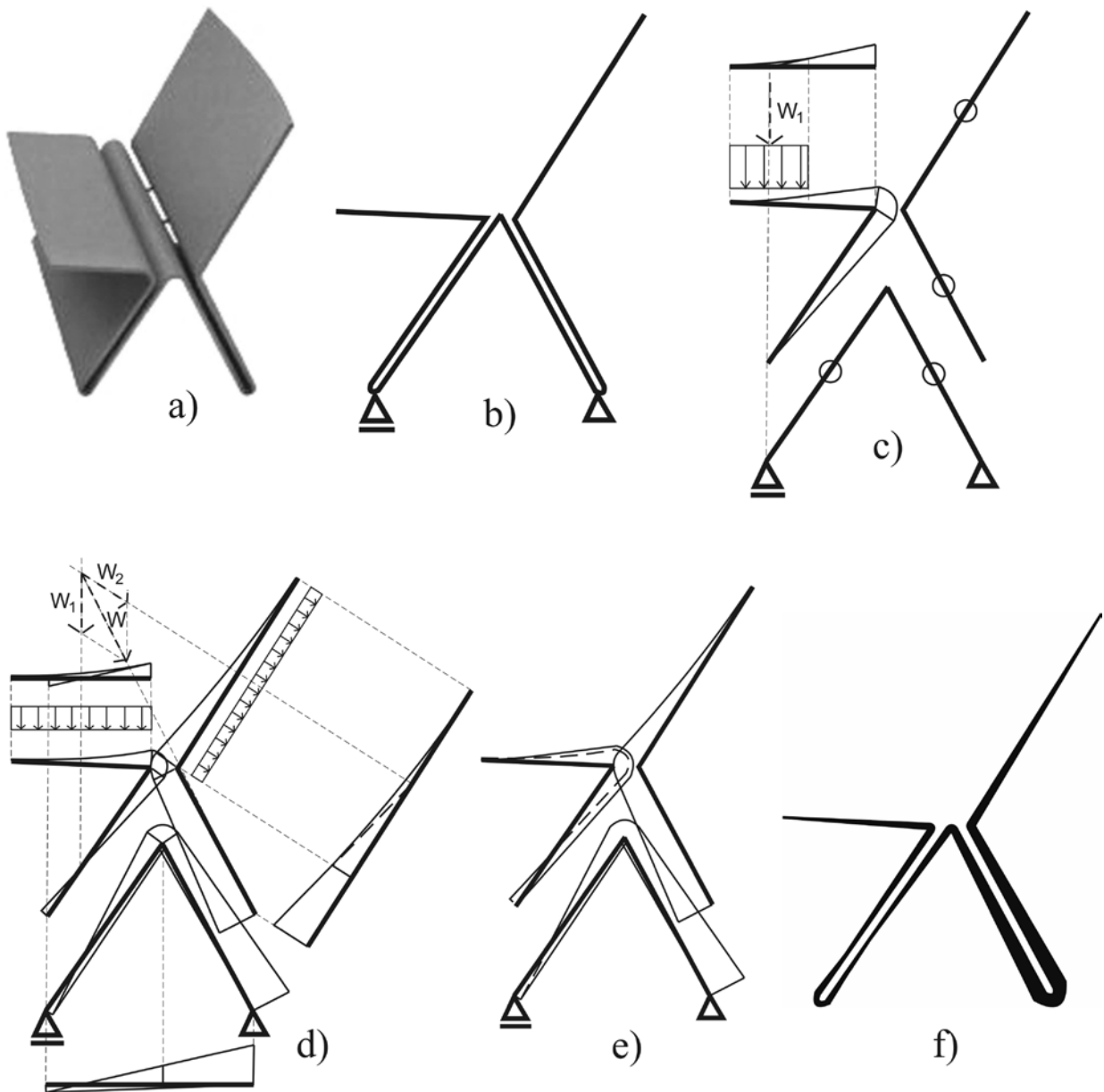


Ryc. 1. „Wijące się” krzesło wspornikowe, projekt: Frank Gehry: a) widok, źródło: http://www.bonluxat.com/a/Frank_Gehry_Wiggle_Side_Chair.html, b-d) schemat i wykresy momentów od różnych obciążeń, e) obwiednia momentów, f) zmiana grubości płyty wynikająca z pracy konstrukcji; rys. autorka

łączącą wartości momentów na końcach wsporników. Na rycinie 1e przedstawiona jest obwiednia momentów z rycin 1c i 1d, a na rycinie 1f – przykładowa forma przekroju ławki z grubościami płyty dostosowanymi do wartości obwiedni.

Stół zaprojektowany przez brazylijskiego architekta Oscara Niemeyera jest zaprezentowany na rycinie

3. Blat stołu składa się z dwóch wspornikowych części, utwierdzonych w miejscu połączenia z podstawą. Podstawa jest swobodnie podpartą belką o zakrzywionej osi, w środku której jest utwierdzony wspornikowy pręt pionowy, podtrzymujący blat. Rozważane są dwa przypadki obciążenia: na całym blacie - na rycinie 3b i na połowie blatu - na rycinie 3c. Obciążenie na cało-

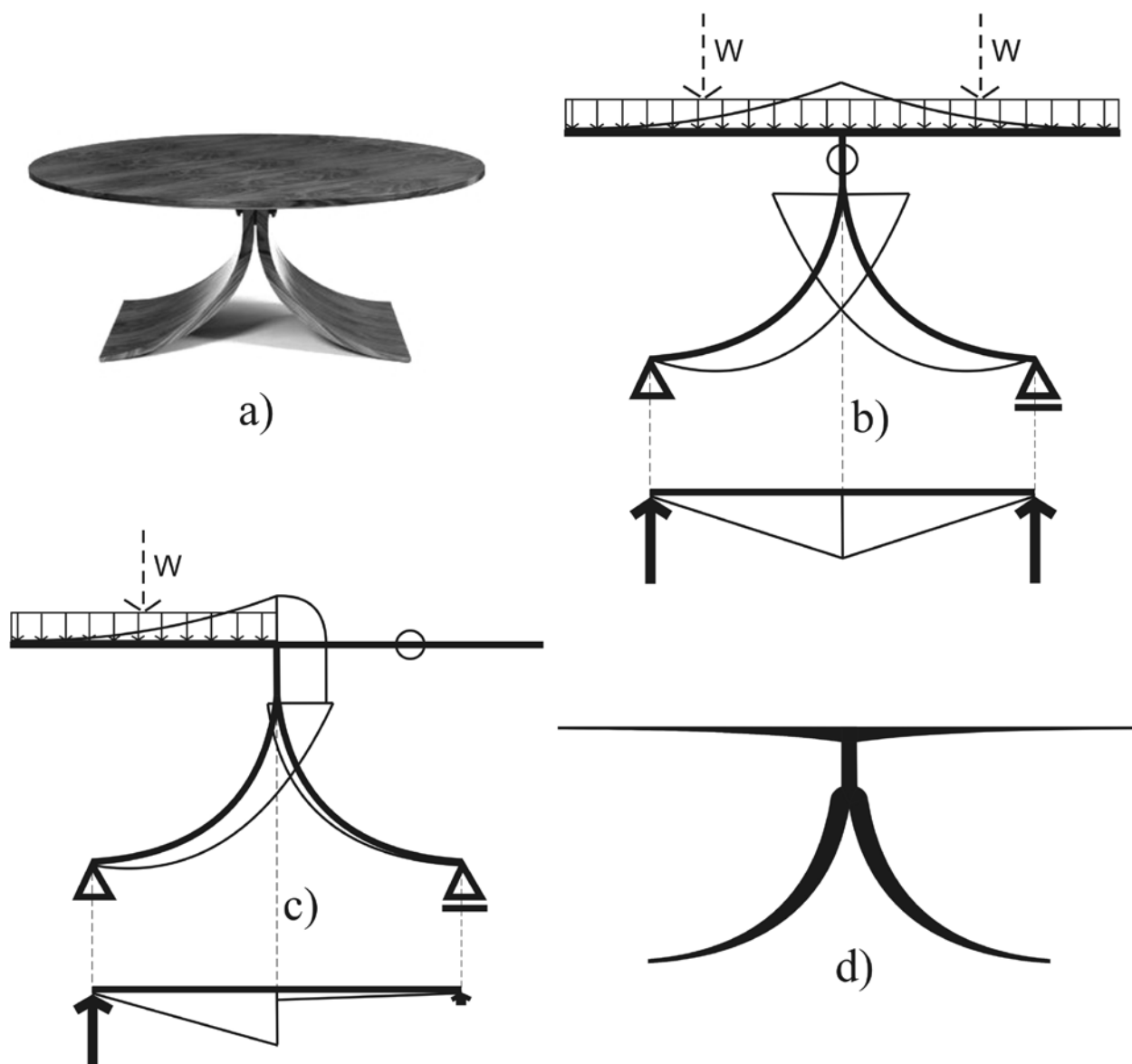


Ryc. 2. Ławka, projekt Joel Escalona: a) widok, źródło: <http://thedesigntime.com/furniture/438-v-outdoors-furniture-collection-by-joel-escalona>, b) schemat, c-d) wykresy momentów od różnych obciążeń, e) obwiednia momentów, f) zmiana grubości płyty wynikająca z pracy konstrukcji; rys. autorka

ści dają maksymalne wartości momentów na swobodnie podpartej części podstawy. Wykres momentów na obciążonym blacie jest identyczny w obu przypadkach obciążenia. Obciążenie tylko po jednej stronie zgina pionowy pręt podstawy, a wartość momentu jest taka sama jak maksymalna wartość na blacie. Największa wartość momentu stołu występuje na swobodnie pod-

partej podstawie ze względu na największe ramię siły powodującej moment (reakcji w podporze). Forma płyty o grubościach dostosowanych do maksymalnych wartości bezwzględnych momentów jest zademonstrowana na rycinie 3d.

Brazylijski projektant mebli Sergio Fahrer jest autorem krzesła z ryciny 4. Na rycinie 4b pokazane są



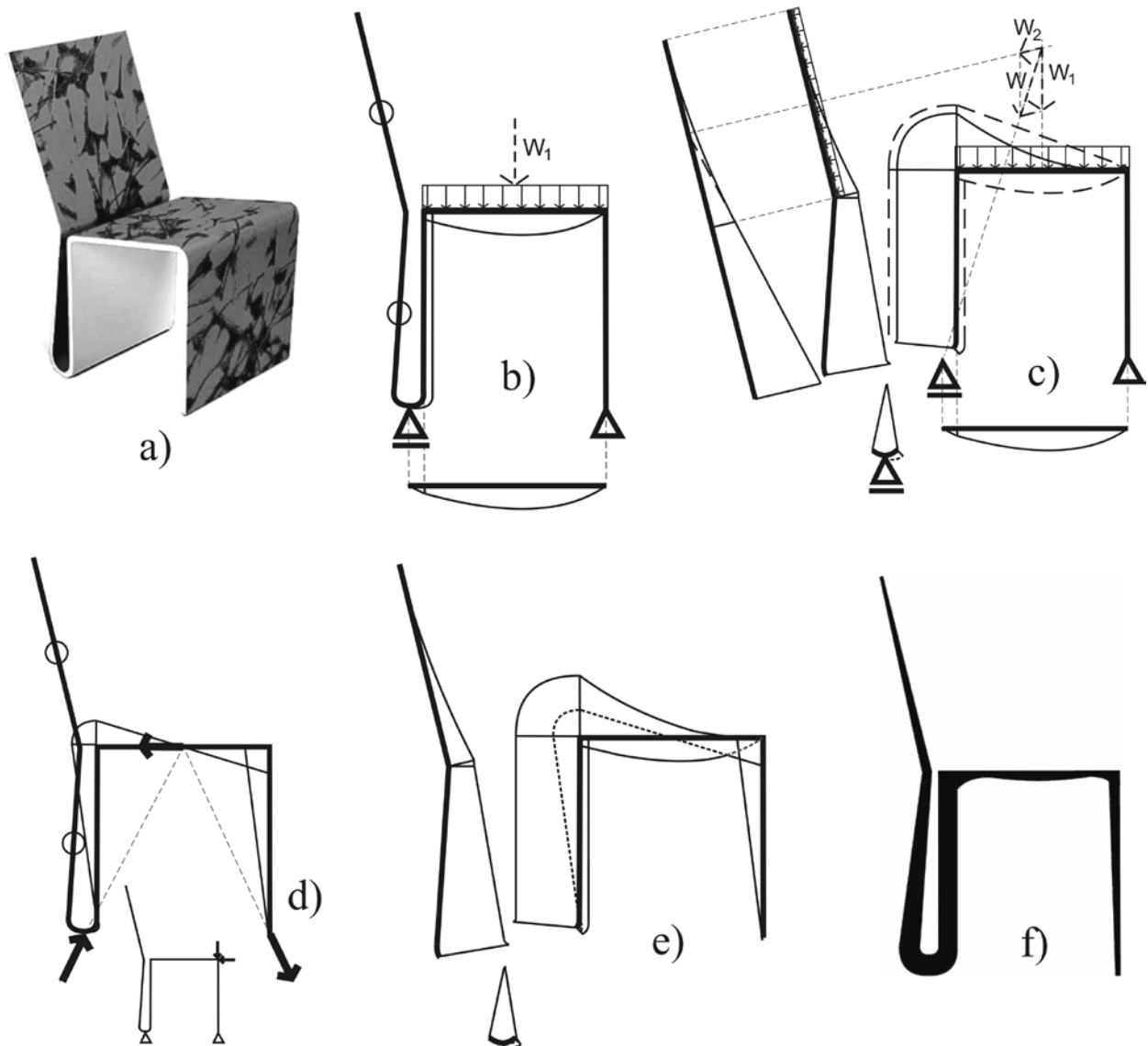
Ryc. 3. Stół, projekt Oscar Niemeyer: a) widok, źródło: <http://www.edition20.com/en/products/Niemeyer-dining-table-by-R-20th-Century-Design-by-Oscar-Niemeyer>, b-c) schematy i wykresy momentów od różnych obciążeń, d) zmiana grubości płyty wynikająca z pracy konstrukcji; rys. autorka

efekty zginania spowodowanego ciężarem osoby siedzącej. Przy swobodnym przesuwie nóg zginana część pracuje jak swobodnie podparta belka o osi zakrzywionej. Wykres momentów takiej belki, zamieszczony na dole, jest taki sam jak wykres poziomej, prostej belki. Wykres momentów od obciążenia równocześnie działającego na siedzisko i oparcie jest pokazany na rycinie 4c, z wykresem od obciążenia pionowego takim samym jak na rycinie 4b. Obciążenie przekazywane na wspornikowe oparcie zgina to oparcie i swobodnie podpartą belkę. Wykres na części z dwiema podporemami spowodowany przez równoczesne działanie obu

obciążeń jest superpozycją obu przypadków. Jeśli podczas poziomego przesuwania krzesła zostanie uniemożliwiony przesuw nóg, to zginanie zakończy się wykresem momentów jak na rycinie 4d. Przekrój przez płytę, o grubości dostosowanej do obwiedni momentów z ryciny 4e, jest zaprezentowany na rycinie 4f.

PODSUMOWANIE

Meble płytowe zginane jednokierunkowo w wyniku działania obciążeń użytkowych deformują się do powierzchni walcowych. Obwiednie wykresów mo-



Ryc. 4. Krzesło, projekt Sergio Fahrer: a) widok, źródło: <http://www.arcoweb.com.br/design/christian-ullman-eduardo-cronemberger-diogo-lage-andre-marx-claudia-moreira-salles-baba-vacaro-estevao-toledo-paulo-alves-pedro-petry-e-sergio-fahrer-design-sustentavel-13-11-2007.html>, b-d) schematy i wykresy momentów od różnych obciążeń, e) obwiednia momentów, f) zmiana grubości płyty wynikająca z pracy konstrukcji; rys. autorka

mentów, sporządzone dla płaskich schematów statycznych takich mebli, umożliwiają zaprojektowanie płyt o zmiennej grubości. Formy tych płyt są uzależnione od typów schematów mebli i sposobu przekazywania obciążeń.

Wspornikowe oparcia krzesła o zmiennej grubości, z obciążeniem poziomym lub zbliżonym do poziomego, są najcieńsze na swobodnym końcu i coraz grubsze im bliżej utwierdzenia w podstawie (ryc.2 i ryc.4) lub utwierdzenia w dalszej części wspornika w krzesłach wspornikowych (ryc.1). Wspornikowe siedziska, zazwyczaj poziome (ryc.1 i ryc.2) lub wspornikowe, poziome

blaty stołów (ryc.3) na części bezpośrednio obciążonej pionowo mają podobne formy o zmiennej grubości – cieńsze od strony swobodnego końca i o stale zwiększającej się grubości w przeciwnym kierunku. Wspornikowa część płyty, łącząca siedzisko (ryc.1) lub blat (ryc.3) z utwierdzeniem w podstawie, ma grubość tym większą, im jest bardziej oddalona od wypadkowej pionowego obciążenia na całym siedzisku lub blacie. Swobodnie podparte podstawy, które nie są bezpośrednio obciążone, są najcieńsze w miejscu zakończenia płyty, a pogrubione w przeciwnym kierunku, aż do miejsca połączenia ze wspornikowym oparciem (ryc.1) lub blatem

(ryc.3). Swobodnie podparte podstawy bez bezpośredniego obciążenia, do których dołączone są wsporniki z obu stron (ryc.2), mają duże grubości na obu końcach, pełniących funkcję utwierdzeń dla wsporników. Podstawy o schemacie swobodnie podpartych belek, które otrzymują bezpośrednie obciążenie od osoby siedzącej (ryc.4), charakteryzują się dużą grubością w środku rozpiętości pomiędzy podporami, ale największą grubość mają na końcu, będącym utwierdzeniem dla oparcia.

Analizy strukturalne przedstawione w artykule pokazują, jak można w widoczny sposób wpływać na formę mebli płytowych, zmniejszając zużycie materiału, bez uszczerbku dla trwałości wyrobów i bez utraty ich walorów estetycznych. Wykorzystanie najnowszych technologii, które stają się coraz tańsze i bardziej dostępne, na przykład drukowania 3D, pozwala tworzyć niekonwencjonalne, lekkie formy mebli, nie martwiąc się o złożoność projektów i koszty ich wykonania.

LITERATURA

1. **Allen E. i in. (2010)**, *Form and forces: designing efficient, expressive structures*, John Wiley & Sons, New Jersey.
2. **Charleson A. W. (2005)**, *Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers*, Elsevier: Architectural Press, Amsterdam.
3. **Grater A. (2002)**, Interview with Ivan Margolius, "Architectural Design", Vol. 72, no. 4, 126-127.
4. **Holgate A. (1986)**, *The art in structural design*, Oxford University Press, New York.
5. **Holgate A. (1992)**, *Aesthetics of built form*, Oxford University Press, New York.
6. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus”, vol. 4, 45-55.
7. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus”, vol. 4, 56-65.
8. **Macdonald A. J. (2001)**, *Structure and Architecture*, Architectural Press, Oxford.
9. **Mainstone R. J. (1983)**, *Developments in structural form*, Middlesex: Penguin Books, London.
10. **Margolius I. (2002)**, *Architects + engineers = structures*, John Wiley & Sons, Chichester.
11. **Merkel J. (2002)**, *Ali Tayar Furniture as Structure*, "Architectural Design", vol. 72, no. 4, 81-83.
12. **Nervi P. L. (1965)**, *Aesthetics and Technology in Building*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
13. **Sebestyen G., Pollington C. (2003)**, *New Architecture and Technology*, Architectural Press, Oxford.
14. **Salvadori M. (1975)**, *Structure in architecture: the building of buildings*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
15. **Siegel C. (1974)**, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa.
16. **Torroja E. (1958)**, *Philosophy of Structures*, University of California Press, Los Angeles.
17. **Torroja E. (1961)**, *Logik der Form*, G.D.W. Callwey, München.

Wykorzystane strony internetowe:

- http://www.bonluxat.com/a/Frank_Gehry_Wiggle_Side_Chair.html (ryc. 1a)
- <http://thedesigntime.com/furniture/438-v-outdoors-furniture-collection-by-joel-escalona> (ryc. 2a)
- <http://www.edition20.com/en/products/Niemeyer-dining-table-by-R-20th-Century-Design-by-Oscar-Niemeyer> (ryc. 3a)
- <http://www.arcoweb.com.br/design/christian-ullman-eduardo-cronemberger-diogo-lage-andre-marx-claudia-moreira-salles-baba-vacaro-estevao-toledo-paulo-alves-pedro-petry-e-sergio-fahrer-design-sustentavel-13-11-2007.html> (ryc. 4a)

Artykuł zrealizowany w ramach pracy statutowej S/WA/1/2011.