KSZTAŁTOWANIE FORM MEBLI O SCHEMATACH ZAKRZYWIONYCH SWOBODNIE PODPARTYCH BELEK ZE WSPORNIKAMI PRZYŁĄCZONYMI POZA KOŃCAMI BELEK

Agata Kozikowska

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

SHAPING FURNITURE FORMS OF SCHEMES OF SIMPLY SUPPORTED CURVED BEAMS WITH CANTILEVERS ATTACHED OUTSIDE THE ENDS OF THE BEAMS

Abstract
The paper deals with shaping forms of furniture with simply supported curved beam and curved cantilever schemes. The considered furniture structures have to carry gravity loads that cause bending. Therefore, their cross-sections are adjusted to maximum values of bending moments. The most unfavourable load locations are established on the basis of moment influence lines. The results of the article can be useful to furniture designers, interior designers, and architects by showing the relationship between optimal furniture forms and shapes of their bars and plates.

Streszczenie
Przedmiotem pracy jest kształtowanie form mebli, których schematem konstrukcyjnym jest swobodnie podparta zakrzywiona belka z przyłączonymi do niej zakrzywionymi wspornikami. Rozważane konstrukcje muszą przenosić grawitacyjne obciążenia, które powodują zginanie. Dlatego kształty ich przekrojów są dostosowywane do maksymalnych wartości momentów zginających. Najbardziej niekorzystne położenia obciążeń są ustalane w oparciu o linie wpływowe momentów. Wyniki pracy mogą być przydatne projektantom mebli, projektantom wnętrz i architektom, pokazując zależność optymalnych form przekrojów tych mebli od kształtów ich prętów i płyt.

Keywords: furniture design; curved-axis beam; simply supported beam; cantilever; structural forms

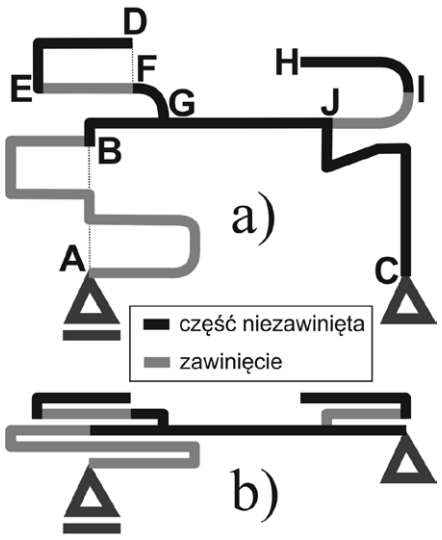
Słowa kluczowe: projektowanie mebli; belka zakrzywiona; belka swobodnie podparta; wspornik; formy strukturalne

WPROWADZENIE

Architekci i projektanci mebli powinni opierać swoje pomysły nie tylko na inspiracji twórczej, ale również na znajomości pracy konstrukcji. Wielu autorów propagowało te idee w swoich pracach, zachęcając do czynienia konstrukcji czynnikiem decydującym o nadawaniu formy obiektom. Siegel twierdził, że warunkiem właściwego kształtowania form jest odkrycie zależności miedzy funkcją, konstrukcją i formą[1]. Allen i Zalewski postulowali, aby inżynierowie starali się pomóc architektom zrozumieć związek formy z jej właściwościami nośnymi i nauczyć ich, w jaki sposób poprawić jakość projektu, wykorzystując uwarunkowania konstrukcyjne[2]. Macdonald ukazywał korzystny wpływ form konstrukcyjnych na wydajność projektu[3]. Kolendowicz zajmował się kształtowaniem przekrojów konstrukcji na podstawie wykresów ich momentów. Pisał, że otrzymywane w ten sposób formy są logiczne i stanowią źródło zadowolenia estetycznego[4]. Autorka również uważa, że analiza pracy ustroju nośnego powinna być zachętą do projektowania form strukturalnych, podkreślających konstrukcję, ekonomicznych i zarazem estetycznych. Zagadnienia projektowania form mebli w oparciu o pracę ich ustroju nośnego były omawiane we wcześniejszych artykułach autorki[5,6,7,8].

W artykule omawiane są meble prętowe i płytowe zginane w jednym kierunku, obciążane przede wszystkim grawitacyjnie (pionowo do dołu), których schematem statycznym jest zakrzywiony pręt oparty na końcach (np. pręt ABC na ryc. 1) oraz jeden lub dwa zakrzywione pręty (np. DEFG i HIJ na ryc. 1), przyłączone do opartego pręta w rozgałęzionych węzłach. Oparty pręt jest swobodnie podpartą belką z podporami przegubowymi na dole (punkty A i C na ryc. 1). Przyłączone pręty są wspornikami z utwierdzeniami w rozgałęzionych węzłach (punkty G i J na ryc. 1). Zakrzywienia belki i wsporników mogą być gładkie, ze stopniowo zmieniającą się krzywizną lub nagłe, gdy w jakimś punkcie występują inne nachylenia pręta z obu stron. Zakrzywione pręty mogą tworzyć zawinięcia, gdy jakieś fragmenty są nad lub pod innymi (nie licząc odcinków pionowych). Podział schematu na części niezawinięte i zawinięcia jest inny dla swobodnie podpartej belki niż dla wsporników. Część niezawinięta swobodnie podpartej belki, która występuje zawsze, przebiega między liniami pionowymi przechodzącymi przez podpory z uwzględnieniem odcinków pionowych (BC na ryc. 1). Pozostałe fragmenty swobodnie podpartej belki są jej zawinięciami (AB na ryc. 1). Część niezawinięta wspornika, która zawsze jest obecna (części DE i HI na ryc. 1), przebiega od swobodnego końca aż do pojawienia się pręta, który jest powyżej lub poniżej. Zawinięcie wspornika występuje od końca części niezawiniętej (punkty E i I na ryc. 1) aż do przecięcia z linią pionową przechodzącą przez swobodny koniec (punkt F na ryc. 1) albo do utwierdzenia wspornika w swobodnie podpartej belce (punkt J na ryc. 1), w zależności od tego, który z tych punktów wystąpi wcześniej. Jeśli wspornik występuje poza linią pionową przechodzącą przez jego swobodny koniec, to ten fragment aż do utwierdzania jest również częścią niezawiniętą (FG na ryc.1). Określenie „między i poza liniami pionowymi przechodzącymi przez podpory" będzie w artykule stosowane wymiennie z określeniem „między i poza podporami", a określenie „linia pionowa przechodząca przez prawą/lewą podporę" będzie zastępowane określeniem „linia prawej/lewej podpory".

Wszelkie konstrukcje nośne są z natury tworami trójwymiarowymi. Jednak, gdy wymiary elementów



Ryc. 1. Podział swobodnie podpartej belki ABC i wsporników DEFG, HIJ w schemacie rzeczywistym a) i zastępczym mebla b): BC – część niezawinięta swobodnie podpartej belki; AB – zawinięcie swobodnie podpartej belki; DE, FG, HI – części niezawinięte wsporników, EF, IJ – zawinięcia wsporników. Rys. autorka
Fig. 1. Division of simply supported beam ABC and cantilevers DEFG, HIJ in actual scheme a) and corresponding scheme b) of piece of furniture: BC – uncoiled part of statically determinate beam; AB – coiled part of statically determinate beam; DE, FG, HI – uncoiled parts of cantilevers, EF, IJ – coiled parts of cantilevers. Fig. the author

konstrukcji znacznie różnią się między sobą, można zastąpić rzeczywiste, trójwymiarowe konstrukcje ich wyidealizowanymi ustrojami prętowymi (gdy dwa wymiary są znacznie mniejsze, jak w przypadku belek) lub powierzchniowymi (gdy tylko jeden wymiar jest zdecydowanie mniejszy, jak w przypadku płyt). Zazwyczaj przyjmuje się, że wymiar jest znacznie mniejszy, jeśli nie przekracza 1/10 długości belki lub rozpiętości płyty. Również trójwymiarowy stan naprężeń, występujący w konstrukcjach bryłowych i dowolnie obciążonych, w przypadku konstrukcji prętowych i powierzchniowych może być znacznie uproszczony przy spełnieniu określonych warunków[9]. Przyjęto, że belki występujące w artykule mają mały przekrój poprzeczny w porównaniu do ich długości, a płyty mają małą grubość w porównaniu do ich rozpiętości. Założono, że nie są uwzględniane siły normalne, odkształcenia

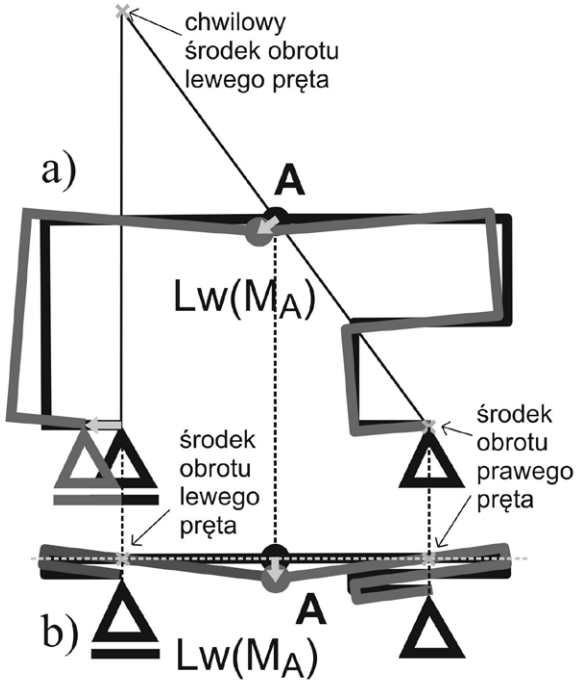
[1] C. Siegel, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa 1974, s. 151.
[2] A. Allen, W. Zalewski, *Form and forces. Designing efficient expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ 2010, s. 614.
[3] A. J. Macdonald, *Structure and Architecture*, Architectural Press, Oxford 2001, s. 30.
[4] T. Kolendowicz, *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady, Warszawa 1977, s. 254-258.
[5] A. Kozikowska, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, „Architecturae et Artibus" nr 4, 2010, s. 45-55.
[6] Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus" nr 4, 2010, s. 56-65.
[7] Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji płyt zginanych jednokierunkowo,* „Architecturae et Artibus" nr 1, 2013, 69-78.
[8] Idem, *Forma a konstrukcja mebli. Stoły*, „A rchitecturae et Artibus" nr 3, 2013, s. 18-29.
[9] K.D. Hjelmstad, *Fundamentals of Structural Mechanics*, Springer, NY 2005, s. 241, 293.

osi belek są zerowe i nie ma deformacji w środkowych płaszczyznach płyt. Przyjęto założenie, że nie są uwzględniane siły tnące, przekroje belek są zawsze prostopadłe do ich osi neutralnych, a linie prostopadłe do środkowych płaszczyzn płyt przed deformacją pozostają prostopadłe również po deformacji. Założono, że naprężenia normalne w kierunku poprzecznym do powierzchni płyt oraz naprężenia w płaszczyznach prostopadłych do płaszczyzn jednokierunkowego zginania płyt, zależne od liczby Poissona[10], są niewielkie i mogą być pominięte. Ponadto przyjęto założenie, że wszystkie elementy są wykonane z jednorodnego, izotropowego, liniowo-sprężystego materiału, ugięcia są małe, belki są obciążane w płaszczyznach zakrzywienia prętów, a zakrzywienia płyt i ich obciążenia umożliwiają zastosowanie do płyt schematów belkowych. W takich przypadkach możliwe jest uwzględnianie w belkach i zginanych walcowo płytach tylko naprężeń normalnych, spowodowanych przez momenty zginające.

Położenia obciążeń dające maksymalne wartości momentów zginających w różnych punktach pręta nie są oczywiste w przypadku krzywych belek z zawinięciami. Mechanizmem umożliwiającym znalezienie takich położeń są linie wpływu momentów zginających, omawiane w większości książek z mechaniki konstrukcji[11,12,13]. Sporządzanie linii wpływowych momentów dla belek zakrzywionych jest łatwiejsze po zastąpieniu zakrzywionego schematu belki zastępczym schematem, złożonym z prostych prętów. Sposób tworzenia zastępczego schematu jest przedstawiony na rycinach 1 i 2. Metoda konstruowania linii wpływu momentów statycznie wyznaczalnych zakrzywionych belek ze wspornikami dla zastępczego schematu, zamiast dla rzeczywistego, zaproponowana przez autorkę i stanowiąca uproszczenie znanej ogólnej metody, w przypadku obciążeń grawitacyjnych, jest pokazana na rycinie 2. Schemat zastępczy krzywej belki powstaje poprzez rzuty prostokątne wszystkich punktów zakrzywionego pręta na blisko siebie położone proste poziome tak, aby części leżące powyżej lub poniżej w krzywej belce pozostały takie również w schemacie zastępczym (ryc. 1 i 2). Tworzenie linii wpływu momentu metodą kinematyczną dla rzeczywistego zakrzywionego schematu polega na wstawieniu przegubu w przekroju, w którym poszukujemy maksymalnego momentu (punkt A na ryc. 2a), i takim przemieszczeniu belki, by nastąpiła zmiana kąta pomiędzy prętami z obu stron dodanego przegubu[14]. Linia wpływu pozwala ustalić położenie obciążenia dającego maksymalny moment po rozciąganej stronie pręta, to znaczy po tej stronie, gdzie powstaje kąt większy od początkowego. Dodany przegub dzieli cały pręt na dwie części, z których każda jest połączona z jedną podporą przegubową. Pręt połączony z podporą nieprzesuwną (prawy na ryc. 2a) obraca się dookoła tej podpory. Podczas tego obrotu dodany przegub przesuwa się prostopadle do promienia, poprowadzonego od środka obrotu w podporze nieprzesuwnej. Pręt połączony z podporą przesuwną (lewy na ryc. 2a) obraca się dookoła chwilowego środka obrotu, który leży na przecięciu linii prostopadłych do przemieszczenia dodanego przegubu i do poziomego przemieszczenia podpory przesuwnej. W przypadku poszukiwania najbardziej niekorzystnego obciążenia interesują nas tylko przemieszczenia równoległe do kierunku tego obciążenia, czyli pionowe dla grawitacyjnego obciążenia. Te pionowe przemieszczenia, czyli linię wpływu, można skonstruować bezpośrednio dla schematu zastępczego. Po pierwsze, należy dodać przegub w schemacie zastępczym w miejscu rzutu prostokątnego przegubu rzeczywistego schematu na odpowiedni poziomy pręt zastępczego schematu (punkt A na ryc. 2b). Następnie trzeba obrócić każdy z dwóch powstałych prętów zastępczego schematu dookoła jego środka obrotu. Środek obrotu każdego pręta leży na przecięciu linii poziomej przechodzącej przez przegub schematu zastępczego z linią pionową przechodzącą przez podporę, przyłączoną do tego pręta (ryc. 2b). Najbardziej niekorzystne obciążenie musi być skierowane zgodnie z kierunkiem przemieszczenia, czyli powinno być umieszczone nad wszystkimi częściami przemieszczonymi do dołu w stosunku do początkowych położeń. Ponadto ze wszystkich możliwych rozkładów obciążenia wzdłuż belki (np. równomierny, liniowy, nieregularny) najbardziej niekorzystny jest rozkład równomierny z maksymalną możliwą intensywnością.

Liczba i charakter najbardziej niekorzystnych przypadków obciążeń są uzależnione od obecności lub braku zawinięć swobodnie podpartej belki i wsporników oraz od położenia wsporników względem linii podpór belki. Dlatego dobór optymalnych form mebli jest

[10] T. Kolendowicz, op. cit., s. 353-354.
[11] Z. Dyląg, E. Krzemińska-Niemiec, F. Filip, *Mechanika budowli. Tom.1*, PWN, Warszawa, 1989, s. 39-83, 104-109.
[12] C. Hartsuijker, J.W. Welleman, *Engineering Mechanics, Volume 1: Equilibrium*, Springer, Dordrecht 2006, s. 743-763.
[13] D.S. Prakash Rao, *Graphical methods in structural analysis*, Universities Press, Hyderabad 1997, s. 110-153.
[14] Ibidem, s. 110-120.



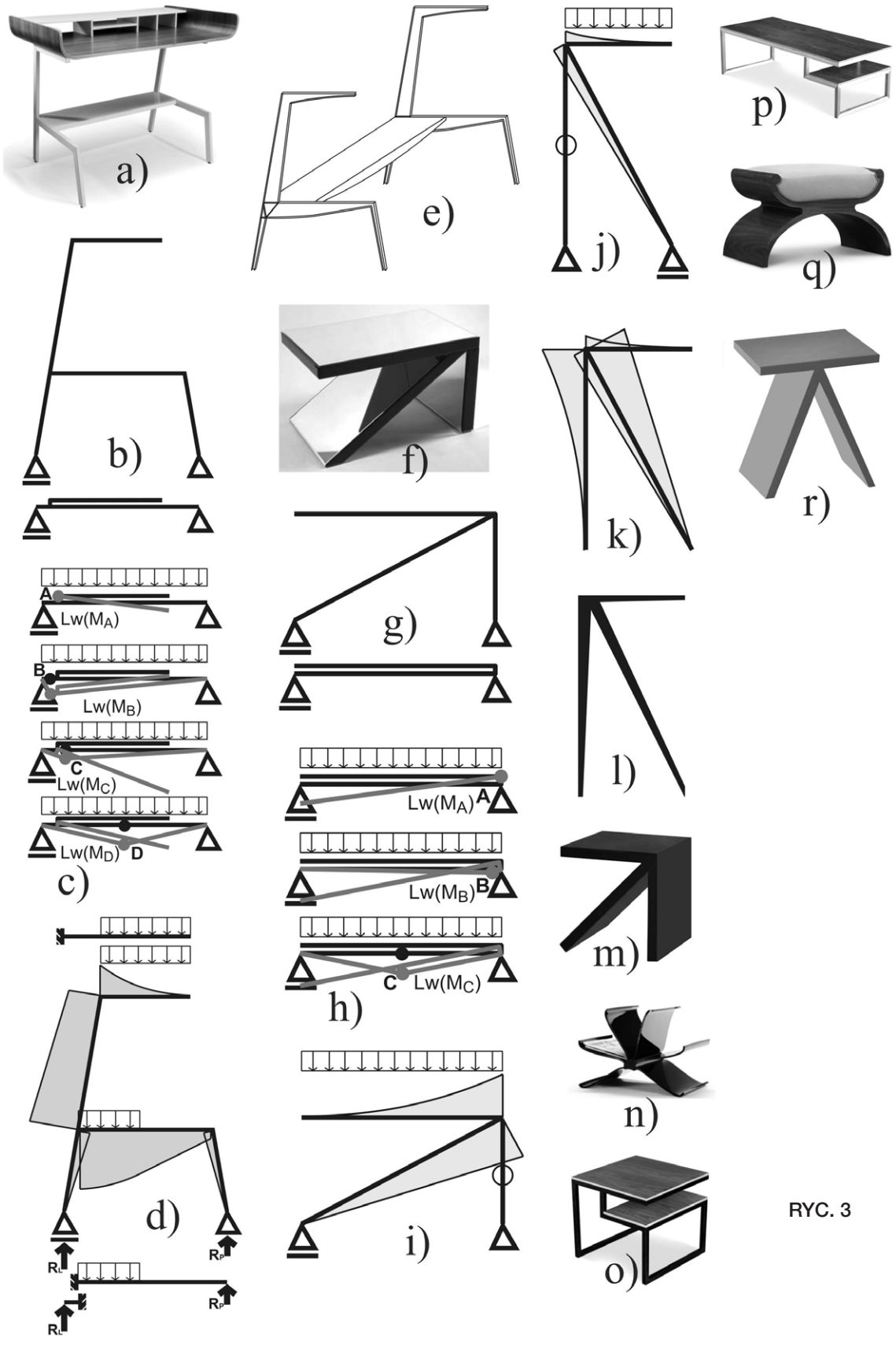
Ryc. 2. Sporządzanie linii wpływu momentu zginającego zakrzywionej belki metodą kinematyczną pod działaniem grawitacyjnego obciążenia: a) dla rzeczywistego zakrzywionego schematu, b) dla zastępczego schematu. Rys. autorka
Fig. 2. Constructing influence line of bending moment for curved beam by kinematic method (Muller-Breslau principle) under the action of gravitational load: a) for actual curved scheme, b) for corresponding scheme. Fig. the author

dokonywany w odrębnych klasach mebli, różniących się właściwościami schematów statycznych. Dla tych schematów na podstawie linii wpływowych momentów zginających są znalezione najbardziej niekorzystne przypadki obciążeń grawitacyjnych i odpowiadające im wykresy momentów. Wykresy momentów zakrzywionych belek, swobodnie podpartych lub wspornikowych, o dowolnym kształcie osi są takie same jak wykresy momentów belek poziomych, tak samo podartych (wspornikowo lub swobodnie) i obciążanych grawitacyjnie w ten sam sposób[15,16,17]. Ta znana reguła jest kilkakrotnie wykorzystywana do sporządzania wykresów momentów. Optymalne wysokości przekrojów belek i grubości płyt mebli są dostosowane do obwiedni maksymalnych momentów, zgodnie z zasadą wyrównywania w każdym przekroju naprężeń normalnych od momentów zginających. Otrzymywane według tej zasady tak zwane równomiernie wytężone konstrukcje są przedstawione między innymi w pracach Timoshenko[18], Gere i Timoshenko[19] oraz Stadlera[20]. Analiza zmienności optymalnych wysokości przekrojów dwuteowych i prostokątnych belek wspornikowych jest przedstawiona we wcześniejszym artykule autorki[21]. Charakter optymalnych zmian wysokości przekrojów belek dwuteowych o stałej szerokości przekroju jest taki sam jak charakter zmian maksymalnych wartości bezwzględnych momentów zginających, gdy pomijamy wytrzymałość środników. Natomiast optymalna wysokość prostokątnego przekroju belki lub płyty o stałej szerokości przekroju jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z bezwzględnej wartości momentu. Optymalne wymiary przekrojów prętów i optymalne grubości płyt są powiększone na rysunkach w celu lepszej wizualizacji.

1. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ I WSPORNIKI MIĘDZY PODPORAMI

Na rycinie 3 przedstawiona jest analiza pracy konstrukcji i dobór optymalnych form mebli o schemacie swobodnie podpartej niezawiniętej belki i niezawiniętych wsporników, które w całości są pomiędzy podporami belki (pomiędzy liniami pionowymi przechodzącymi przez te podpory). Rzeczywisty i zastępczy schemat statyczny biurka z ryciny 3a jest pokazany na rycinie 3b. Poszukiwanie obciążeń grawitacyjnych dających maksymalne wartości momentów w różnych przekrojach tego mebla odbywa się na podstawie linii wpływowych momentów z ryciny 3c, wykonywanych we wszystkich istotnych przekrojach (dających wszystkie możliwe typy linii wpływu). Linia wpływu w przekroju A, znajdującym się przy utwierdzeniu niezawiniętego wspornika, pokazuje, że cały wspornik przemieszcza się do dołu i grawitacyjne obciążenie ciągłe na całym wsporniku daje maksymalny moment na górze wspornika w przekroju A. Natomiast obecność lub brak obciążenia na swobodnie podpartej belce nie ma żadnego wpływu na momenty na wsporniku, ponieważ belka

[15] Z. Dyląg (i in.), *Mechanika budowli. Tom 2*, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 1993 s. 207, 210, 217, 237.
[16] B. Shihua, G. Yaoging, *Structural Mechanics*, Wuhan University Press, Wuhan 2008, s. 56.
[17] A. Ghali (i inni), *Structural Analysis. A unified classical and matrix approach*, Taylor & Francis, NY 2009, s. 33.
[18] S. Timoshenko, *Strength of materials. Part I. Elementary Theory and Problems*, D. Van Nostrand Company, NY 1930, s. 208-209.
[19] J. M. Gere, S. P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, Springer, Dordrecht 1991, s. 291-292.
[20] W. Stadler, *Natural Structural Shapes (A Unified Optimal Design Philosophy)*, „Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences", Springer, NY 1988, s. 370-371.
[21] A. Kozikowska, *… Meble o konstrukcji wspornikowej*, op. cit., s. 49.

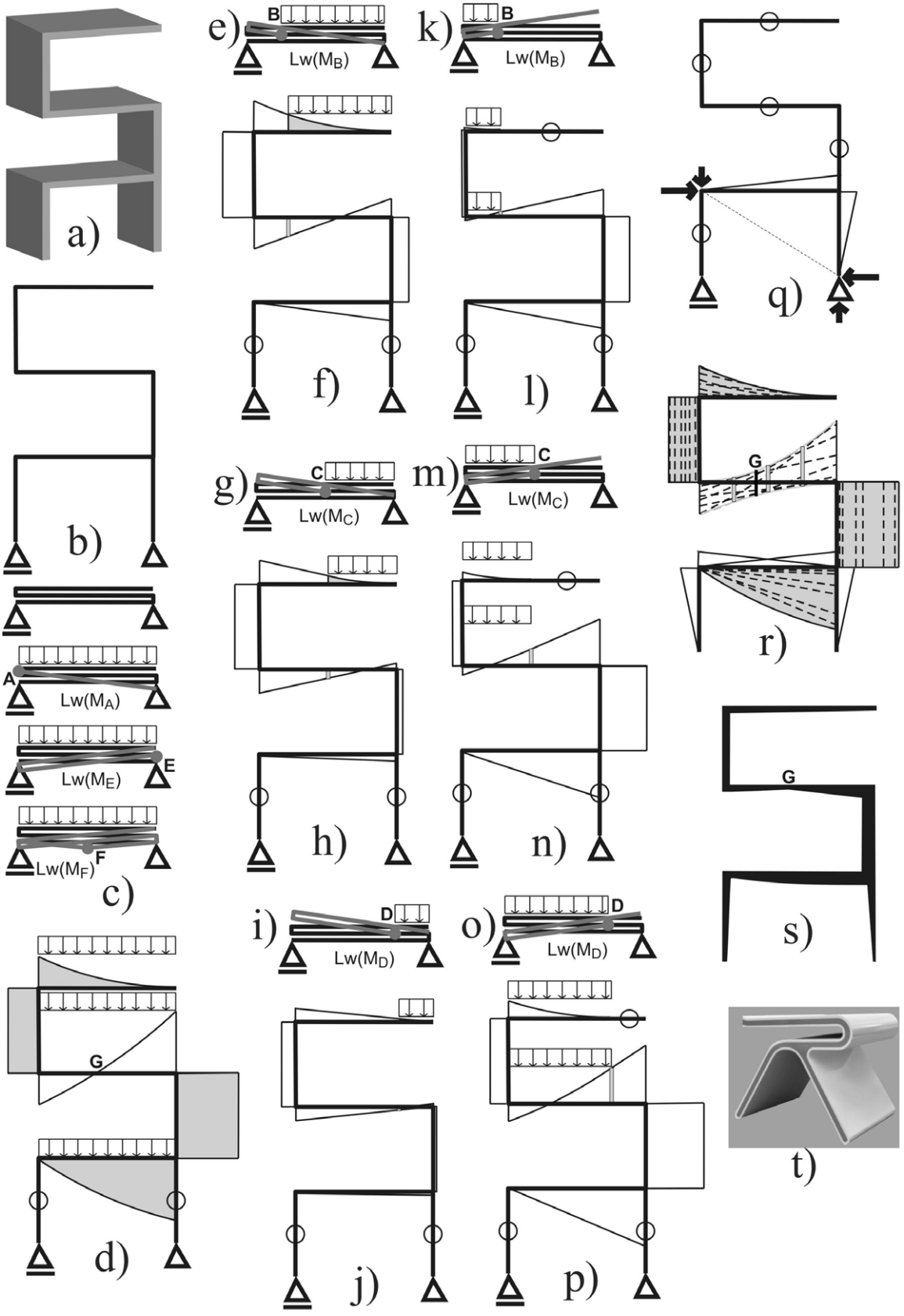


RYC. 3

w tej linii wpływu (punkt A na ryc. 3c) jest pozioma. Linie wpływu momentów w innych przekrojach wspornika mają taki sam charakter i dlatego obciążenie na całym wsporniku bez zawinięć daje największe wartości momentów we wszystkich jego przekrojach. Linie wpływu momentów swobodnie podpartej belki w punkcie B (pomiędzy lewą podporą a rozgałęzionym węzłem) oraz w punktach C i D (pomiędzy prawą podporą a rozgałęzionym węzłem) pokazują, że największe wartości momentów są otrzymywane na dole swobodnie podpartej belki, gdy obciążamy zarówno tę belkę, jak i wspornik, wszędzie, gdzie jest to możliwe. Natomiast momenty na dole wspornika oraz na górze swobodnie podpartej belki nie występują pod wpływem obciążenia grawitacyjnego, ponieważ linie wpływu tych momentów, będące odbiciem zwierciadlanym względem osi poziomej linii z ryciny 3c, nie przemieszczają się nigdzie do dołu. Wykres momentów od jedynego najbardziej niekorzystnego przypadku obciążenia dla biurka z ryciny 3a, z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami momentów we wszystkich punktach schematu, jest zaprezentowany na rycinie 3d, a optymalna konstrukcja z grubościami prętów dostosowanymi do tego wykresu – na rycinie 3e. Stolik pokazany na rycinie 3f ma również taki sam najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia, co pokazują linie wpływowe momentów na rycinie 3h, ale obciążenie może tu być przyłożone tylko na poziomym wsporniku. Kształt mebla daje jednak dwie możliwości oparcia, z podporami o większym i mniejszym rozstawie. Wykresy momentów dla obu wariantów zostały pokazane na rycinach 3i i 3j. Optymalna zmiana grubości płyt tego stolika, pokazana na rycinie 3l, odbywa się według obwiedni z ryciny 3k. Praca konstrukcji mebli zamieszczonych na rycinach 3m – 3r ma ten sam charakter i zmiany grubości ich optymalnych form powinny odbywać się według tych samych zasad. Meble te mają jeden najbardziej niekorzystny przypadek grawitacyjnego obciążenia, z ciągłym obciążeniem we wszystkich możliwych miejscach. Ich schematy statyczne składają się z prętów połączonych w rozgałęzionym węźle: jednego (ryc. 3m, 3o, 3p), dwóch (ryc. 3q, 3r) lub większej liczby (ryc. 3n) wsporników ze swobodnymi końcami i dwóch części swobodnie podpartej belki z podporami przegubowymi na końcach. Takie pręty lub płyty mają zawsze zerowe wartości momentów na końcach i powinny być tam najcieńsze. Jeśli ponadto nie mają zawinięć (tak jak meble z ryc. 3), to powinny być stale pogrubiane, im bliżej są rozgałęzionego węzła.

Ryc. 3. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i niezawiniętych wsporników między podporami: a) biurko, źródło: http://www.gradnja.rs/wp-content/uploads/2012/10/zanimljivi-radni-stolovi.jpg; b) rzeczywisty i zastępczy schemat biurka z ryc. 3a; c) linie wpływu momentów na górze wspornika (A) oraz na dole swobodnie podpartej belki w różnych przekrojach: pomiędzy lewą podporą i punktem przyłączenia wspornika (B) oraz między punktem przyłączenia wspornika i prawą podporą (C i D) z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami we wszystkich przekrojach na górze wspornika i na dole swobodnie podpartej belki; e) forma biurka z ryc. 3a wynikająca z pracy konstrukcji; f) stolik, źródło: http://www.pinkertonmirrors.co.uk/stylish-designer-mirrored-coffee-table-59-p.asp; g) rzeczywisty i zastępczy schemat stolika z ryc. 3f; h) linie wpływu momentów na górze wspornika oraz na dole swobodnie podpartej belki przy prawej podporze oraz w środku z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; i) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami we wszystkich przekrojach na górze wspornika i na dole swobodnie podpartej belki; j) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami we wszystkich przekrojach na górze wspornika i na dole swobodnie podpartej belki dla innego wariantu oparcia stolika; k) obwiednia momentów z ryc. 3i i 3j; l) zmiana grubości płyty stolika z ryc. 3f wynikająca z pracy konstrukcji; m) stolik, źródło: http://bedzine.com/blog/bed-news/pointer-tables-complement-your-modern-bedroom/; n) gazetnik, źródło: http://www.luxlux.pl/artykul/stojak-na-gazety-kartell-16904; o) stolik, źródło: http://roomfu.com/2010/02/fab-finds-side-tables/; p) stolik, źródło: http://www.houzz.com/photos/5768479/Gus-Modern-Ossington-Coffee-Table-modern-coffee-tables; q) stołek, źródło: http://cadieuxinteriors.ca/products/bolier-modern-luxury-biedermeier-stool; r) stołek. Rys. autorka

Fig. 3. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and uncoiled cantilevers between supports: a) desk, source: http://www.gradnja.rs/wp-content/uploads/2012/10/zanimljivi-radni-stolovi.jpg; b) actual and corresponding scheme of the desk from Fig. 3a; c) influence lines of moment at the top of cantilever (A) and at the bottom of simply supported beam in different cross sections: between left support and attachment point of cantilever (B) and between attachment point of cantilever and right support (C and D) with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values in all cross sections at the top of cantilever and at the bottom of simply supported beam; e) form of the desk from Fig. 3a resulting from structural behaviour; f) table, source: http://www.pinkertonmirrors.co.uk/stylish-designer-mirrored-coffee-table-59-p.asp; g) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 3f; h) influence lines of moment at the top of cantilever and at the bottom of simply supported beam next to right support and in the middle with most unfavourable gravitational load; i) moment diagram with shaded maximum values in all cross sections at the top of cantilever and at the bottom of simply supported beam; j) moment diagram with shaded maximum values in all cross sections at the top of cantilever and at the bottom of simply supported beam for another support variant of the table, k) envelope of moments from Fig. 3i and 3j; l) variation of plate thickness for the table from Fig. 3f resulting from structural behaviour; m) table, source: http://bedzine.com/blog/bed-news/pointer-tables-complement-your-modern-bedroom/; n) newspaper holder, source: http://www.luxlux.pl/artykul/stojak-na-gazety-kartell-16904; o) table, source: http://roomfu.com/2010/02/fab-finds-side-tables/; p) table, source: http://www.houzz.com/photos/5768479/Gus-Modern-Ossington-Coffee-Table-modern-coffee-tables; q) stool, source: http://cadieuxinteriors.ca/products/bolier-modern-luxury-biedermeier-stool; r) stool. Fig. the author


a)
b)
A
Lw(M_A)
E
Lw(M_E)
F
Lw(M_F)
c)
G
d)
e)
B
Lw(M_B)
f)
g)
C
Lw(M_C)
h)
i)
D
Lw(M_D)
j)
k)
B
Lw(M_B)
l)
m)
C
Lw(M_C)
n)
o)
D
Lw(M_D)
p)
q)
G
r)
G
s)
t)

RYC. 4

Meble zaprezentowane na rycinie 4 mają schemat swobodnie podpartej belki z zawiniętym wspornikiem, rozciągającym się pomiędzy liniami pionowymi podpór tej belki. Największe wartości momentów na dole belki występują w nich, podobnie jak w meblach z ryciny 2, gdy obciążenie do dołu jest przykładane wszędzie, gdzie jest to możliwe, zarówno na belce, jak i na wsporniku. Linia wpływu momentu w przekroju F na rycinie 3c uzasadnia taki wariant obciążenia dla półki z rycinie 3a. Natomiast zawinięty wspornik wymaga uwzględnienia większej liczby przypadków obciążenia. Obciążenie grawitacyjne na całej części niezawiniętej wspornika daje maksymalny moment w każdym przekroju tej części (linia wpływowa momentu w przekroju A na ryc. 4c). Obciążenie na całym wsporniku znajdującym się między podporami belki, na części niezawiniętej i na zawinięciu, powoduje powstanie największego momentu w utwierdzeniu wspornika (linia wpływowa w przekroju E na ryc. 4c). Natomiast w każdym punkcie zawinięcia wspornika występują dwa inne przypadki obciążenia. Jeden przypadek z obciążeniem na niezawiniętym fragmencie od swobodnego końca do linii pionowej przechodzącej przez badany punkt daje maksymalny moment na dole pręta w tym przekroju. Linie wpływu związane z tym wariantem obciążenia są pokazane dla punktów B, C i D na rycinach 4e, 4g i 4i, a wykresy momentów z maksymalnymi wartościami momentów w przekrojach B, C i D na dole, oznaczonymi zacieniowanymi słupkami – na rycinach 4f, 4h i 4j. Drugi przypadek obciążenia, prowadzący do maksymalnego momentu na górze przekroju zawinięcia, obejmuje obciążenie na części niezawiniętej i zawinięciu po przeciwnej stronie linii pionowej przechodzącej przez ten przekrój. Przypadek ten został pokazany na rycinach 4k, 4m i 4o. Odpowiednie wykresy momentów z maksymalnymi wartościami momentów w przekrojach B, C i D na górze są zamieszczone na rycinach 4l, 4n i 4p. Obciążenia grawitacyjne nie zginają pionowych odcinków na końcach swobodnie podpartej belki, dlatego dodatkowo został uwzględniony przypadek obciążenia siłą poziomą, przedstawiony na rycinie 4q. Oprócz siły poziomej przyłożona jest też siła pionowa do dołu nad podporą, zapobiegająca odrywaniu się tej podpory od podłoża. Obwiednia momentów od wszystkich badanych przypadków obciążenia jest zaprezentowana na rycinie 4r. Po obu stronach zawinięcia wspornika obwiednia jest parabolą, otrzymaną na podstawie aproksymacji wartości momentów w przekrojach B, C i D na górze pręta i na dole. Minimalna wartość bezwzględna obwiedni na zawinięciu występuje w punkcie G, w miejscu zerowego momentu od obciążeń na wszystkich prętach z ryciny 4d. Na rycinie 4s pokazana jest optymalna grubość płyt półki z ryciny 4a, dostosowana do obwiedni z ryciny 4r. Dobór kształtów innych mebli o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i zawiniętego wspornika utwierdzonego poza końcami belki i niewystającego poza linie pionowe podpór belki (np. stołka z ryc. 4t) również wymaga rozważenia jednego wariantu obciążenia dla swobodnie podpartej belki i większej liczby wariantów dla wspornika. W celu uzyskania maksymalnych momentów na swobodnie podpartej belce ustawiamy ciągłe obciążenie do dołu we wszystkich możliwych miejscach. Optymalna wysokość przekroju swobodnie podpartej belki, dostosowanej do tego wykresu momentów, jest najmniejsza przy podporach na dole i rośnie w kierunku rozgałęzionego węzła. Najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia belki prowadzi również do maksymalnego zginania nie-

Ryc. 4. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i zawiniętego wspornika między podporami: a) półka; b) rzeczywisty i zastępczy schemat półki z ryc. 4a; c) linie wpływu momentów na górze niezawiniętej części wspornika (A), na zewnątrz najbardziej wysuniętych na prawo i na lewo zawinięć wspornika (E) oraz na dole części niezawiniętej swobodnie podpartej belki (C) z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym, d) wykres momentów półki z ryc. 4a z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami; e), g), i) linie wpływu momentów na dole zawinięcia wspornika w pojedynczych przekrojach (odpowiednio B, C, D) z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f), h), j) wykresy momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole zawinięcia w pojedynczych przekrojach (odpowiednio B, C, D); k), m), o) linie wpływu momentów na górze zawinięcia wspornika w pojedynczych przekrojach (odpowiednio B, C, D) z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; l), n), p) wykresy momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze zawinięcia w pojedynczych przekrojach (odpowiednio B, C, D); q) wykres momentów półki z ryc. 4a od poziomego obciążenia; r) obwiednia momentów z ryc. 4d, 4f, 4h, 4j, 4l, 4n, 4p, 4q; s) zmiana grubości płyty półki z ryc. 4a wynikająca z pracy konstrukcji; t) stołek, źródło: http://designsandinteriors.com/furniture/sleek-futuristic-chair-furniture-design. Rys. autorka

Fig. 4. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and coiled cantilever between supports: a) shelf; b) actual and corresponding scheme of the shelf from Fig. 4a; c) influence lines of moment at the top of uncoiled part of cantilever (A), on the outside of most right and most left coiled parts of cantilever (E), and at the bottom of uncoiled part of simply supported beam(C) with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram of the shelf from Fig. 4a with shaded maximum values; e), g), i) influence lines of moment at the bottom of coiled part of cantilever in single cross sections (respectively B, C, D) with most unfavourable gravitational load; f), h), j) moment diagrams with shaded maximum values at the bottom of coiled part in single cross sections (respectively B, C, D); k), m), o) influence lines of moment at the top of coiled part of cantilever in single cross sections (respectively B, C, D) with most unfavourable gravitational load; l), n), p) moment diagrams with shaded maximum values at the top of coiled part in single cross sections (respectively B, C, D); q) moment diagram of the shelf from Fig. 4a for horizontal load; r) envelope of moments from Fig. 4d, 4f, 4h, 4j, 4l, 4n, 4p, 4q; s) variation of plate thickness for the shelf from Fig. 4a resulting from structural behaviour; t) stool, source: http://designsandinteriors.com/furniture/sleek-futuristic-chair-furniture-design. Fig. the author

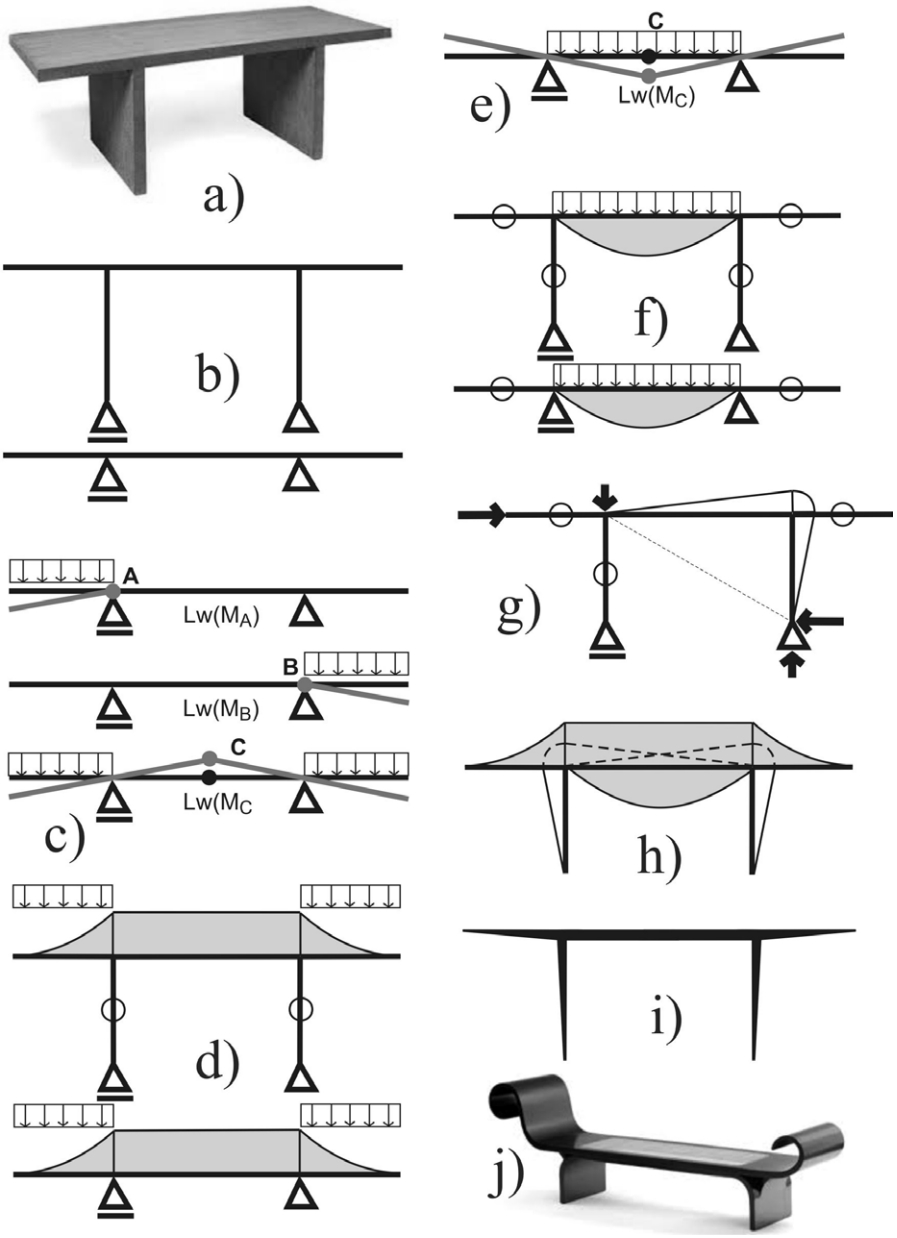
zawiniętych części wspornika. Natomiast znalezienie w miarę dokładnej obwiedni maksymalnych momentów na zawinięciu wspornika wymaga rozpatrzenia dwóch przypadków obciążenia w kilku przekrojach zawinięcia: z obciążeniem na lewo i na prawo od linii pionowej przechodzącej przez każdy przekrój. Prostszy, ale mniej dokładny sposób polega na znalezieniu tylko minimalnej wartości bezwzględnej obwiedni maksymalnych momentów na zawinięciu. Ta minimalna wartość obwiedni występuje w przekroju zawinięcia z najmniejszą wartością momentu od pierwszego przypadku obciążenia. Może to być albo wartość zero (jak w punkcie G na ryc. 4d), albo różna od zera (jak dla stołka z ryc. 4t). W tym przekroju należy rozważyć, jeśli jest to możliwe, oba przypadki z obciążeniem na fragmentach wspornika leżących na lewo (pierwszy przypadek) i na prawo (drugi przypadek) od tego przekroju i wybrać bezwzględnie większą wartość momentu. Optymalna forma niezawiniętych części wspornika jest najcieńsza na swobodnym końcu i rośnie, im bliżej jest utwierdzenia. Optymalna forma części zawiniętej wspornika jest najcieńsza w przekroju o najmniejszej wartości momentów od wszystkich możliwych obciążeń grawitacyjnych na wsporniku.

2. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ I WSPORNIKI POZA PODPORAMI

Meble pokazane na rycinie 5 mają schemat swobodnie podpartej belki bez zawinięć z przyłączonymi wspornikami, leżącymi poza liniami podpór. Schemat taki występuje tylko wtedy, jeśli każda z części swobodnie podpartej belki pomiędzy rozgałęzionym węzłem a podporą jest pionowa. Schematem zastępczym tych mebli w przypadku niezawiniętych wsporników jest prosta pozioma dwupodporowa belka (ryc. 4b). Analiza linii wpływu momentów takiej belki, przedstawiona na rycinach 5c i 5e, ujawnia występowanie dwóch najbardziej niekorzystnych przypadków grawitacyjnego obciążenia. Obciążenie na całych wspornikach prowadzi do maksymalnych wartości momentów na górze niezawiniętych wsporników i na górze swobodnie podpartej belki (ryc. 5d). Obciążenie na swobodnie podpartej belce między liniami podpór daje maksymalne wartości momentów na dole tej części (ryc. 5f). Pionowe odcinki pomiędzy rozgałęzionymi węzłami a podporami nie są zginane przez grawitacyjne obciążenie. Dlatego wskazane jest uwzględnienie w nich zginania od obciążenia poziomego, przedstawionego na rycinie 5g. Optymalna grubość płyt ławki z ryciny 5a, dostosowana do obwiedni z ryciny 5h, jest pokazana na rycinie 5i. Grubości płyty jej niezawiniętych wsporników i pionowych odcinków są coraz większe im bliżej rozgałęzionego węzła, zaś grubość płyty swobodnie podpartej belki pomiędzy tymi węzłami jest stała. W innych meblach o tym samym schemacie optymalne formy przekrojów niezawiniętych wsporników i pionowych części będą takie same. Natomiast optymalny kształt części pomiędzy węzłami zależy od stosunku rozpiętości swobodnie podpartej belki do rozpiętości wsporników. Gdy wsporniki są niezawinięte, gdy mogą być wszędzie obciążane i gdy rozpiętości wsporników są równe lub większe niż dwukrotna rozpiętość wszędzie obciążanej belki, to grubość pomiędzy rozgałęzionymi węzłami też będzie stała (zgodna z wykresem momentów z ryc. 5d). W innych przypadkach maksymalny moment na środku części między węzłami, pochodzący z wykresu, takiego jak na rycinie 5f, może być większy niż moment z ryciny 5d. W takiej sytuacji optymalna forma tej części będzie pogrubiona w środku rozpiętości. Optymalne grubości zawiniętych części wsporników powinny być dobierane na podstawie wariantów obciążeń przedstawionych na rycinie 4.

3. SWOBODNIE PODPARTA BELKA BEZ ZAWINIĘĆ ORAZ WSPORNIKI MIĘDZY I POZA PODPORAMI

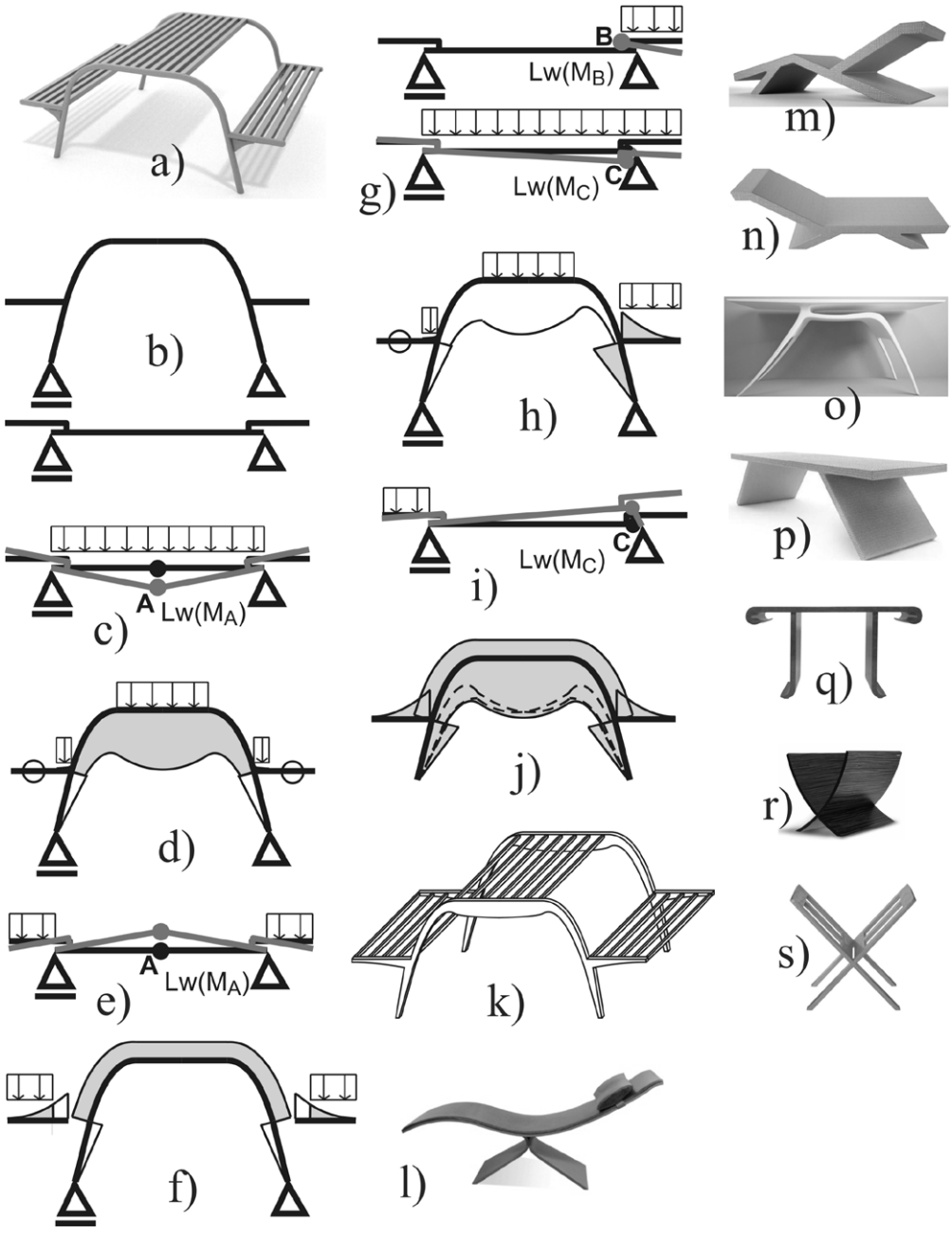
Kształtowanie optymalnych form mebli o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i wsporników leżących zarówno pomiędzy, jak i poza podporami powinno być poprzedzone znalezieniem wykresów momentów od trzech przypadków obciążenia. Pierwszy wariant obciążenia, przedstawiony na rycinie 6c dla stołu z ryciny 6a, uwzględnia obciążenie na całej swobodnie podpartej belce (jeśli jest to możliwe), na prawym wsporniku na lewo od linii prawej podpory i na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory. Wariant ten prowadzi do maksymalnych wartości momentów na dole belki pomiędzy punktami przyłączenia wsporników (zacieniowany fragment wykresu na ryc. 6d). Drugi wariant obejmuje obciążenie na prawym wsporniku na prawo od linii prawej podpory i na lewym wsporniku na lewo od linii lewej podpory (ryc. 6e). Takie obciążenie daje największe możliwe wartości momentów na górze belki między rozgałęzionymi węzłami (ryc. 6f). Trzeci wariant obciążenia pozwala uzyskać maksymalne wartości momentów na dole belki między prawą podporą i rozgałęzieniem (ryc. 6h). Wariant ten uwzględnia obciążenie na całej swobodnie podpartej belce, na prawym wsporniku na prawo od linii lewej podpory i na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory (ryc. 6g). Wariant ten dla stołu z ryciny 6a daje również maksymalne wartości momentów na górze prawego wspornika. Przypadek obciążenia powodujący maksymalne zginanie belki między lewą podporą



Ryc. 5. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i wsporników poza podporami: a) ławka, projekt Frank Gehry, źródło: http://www.gr8lessons.com/design2/coffeetableDESIGNERS04.html; b) rzeczywisty i zastępczy schemat ławki z ryc. 5a; c) linie wpływu momentów na górze wsporników (A, B) oraz na górze swobodnie podpartej belki (C) z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze wsporników i na górze swobodnie podpartej belki; e) linia wpływu momentów na dole swobodnie podpartej belki z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole swobodnie podpartej belki; g) wykres momentów ławki z ryc. 5a od poziomego obciążenia; h) obwiednia momentów z ryc. 5d i 5f, i) zmiana grubości płyty ławki z ryc. 5a wynikająca z pracy konstrukcji; j) ławka, projekt Oscar Niemeyer, źródło: http://www.etelinteriores.com.br/colecao_item.php?id_peca=252. Rys. autorka

Fig. 5. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and cantilevers beyond supports: a) bench, design: Frank Gehry, source: http://www.gr8lessons.com/design2/coffeetableDESIGNERS04.html; b) actual and corresponding scheme of the bench from Fig. 5a; c) influence lines of moment at the top of cantilevers (A, B) and at the top of simply supported beam (C) with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the top of cantilevers and at the top of simply supported beam; e) influence line of moments at the bottom of simply supported beam with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of simply supported beam; g) moment diagram of the bench from Fig. 5a for horizontal load; h) envelope of moments from Fig. 5d and 5f; i) variation of plate thickness for the bench from Fig. 5a resulting from structural behaviour; j) bench, design: Oscar Niemeyer, source: http://www.etelinteriores.com.br/colecao_item.php?id_peca=252. Fig. the author

i rozgałęzionym węzłem (z rozciąganiem na dole) jest symetryczny do przypadku z ryciny 6g. Na żadnym z obu fragmentów belki między podporą i rozgałęzionym węzłem nie występuje moment na górze, ponieważ obciążenie, które powodowałoby takie zginanie (przedstawione na ryc. 6i), prowadziłoby do podnoszenia drugiej podpory. Optymalna forma konstrukcji stołu z ryciny 6a, dostosowana do wartości obwiedni momentów od omówionych przypadków obciążenia, jest zaprezentowana na rycinie 6k. Meble pokazane na rycinach 6l-6s również będą miały podobne optymalne formy. Pręty lub płyty takich mebli będą coraz grubsze na częściach od podpór do rozgałęzionych węzłów, im bliżej są węzłów. Część pomiędzy rozgałęzionymi węzłami może być o stałej grubości lub pogrubiona w środku rozpiętości (meble symetryczne), lub pogrubiona w pobliżu środka. Stała grubość ma tym większą szansę wystąpienia, im obciążane części wsporników (prawego poza prawą podporą i lewego poza lewą) są dłuższe. Zmiana grubości wsporników nie zależy od tego, w jakim miejscu belki są one przyłączone, tylko od tego, czy mają zawinięcia. Charakter optymalnych zmian grubości wsporników został omówiony w rozdziale 1.



RYC. 6

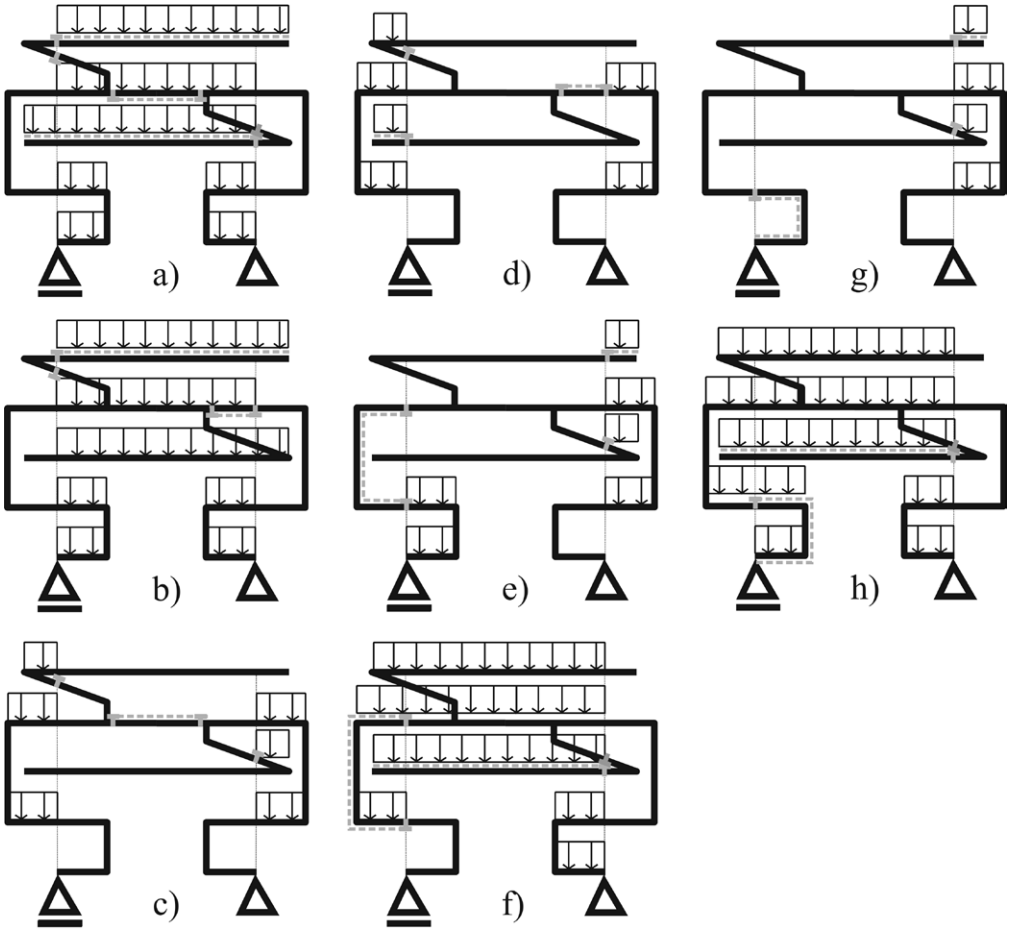
4. SWOBODNIE PODPARTA BELKA Z ZAWINIĘCIAMI MIĘDZY I POZA PODPORAMI ORAZ WSPORNIKI MIĘDZY I POZA PODPORAMI

Najbardziej niekorzystne przypadki ciągłego obciążenia grawitacyjnego belki w meblach o schematach swobodnie podartej belki z dwoma zawinięciami oraz dwóch wsporników przyłączonych do części niezawiniętej swobodnie podpartej belki są pokazane na rycinie 7. Lewe zawinięcie belki rozciąga się poza lewą podporą i między podporami. Prawe zawinięcie belki występuje poza prawą podporą i między podporami. Dlatego pojawiające się niżej określenie „na prawym/ lewym zawinięciu poza podporą" należy rozumieć jako „na lewym zawinięciu poza lewą podporą/ na prawym zawinięciu poza prawą podporą". Natomiast każdy ze wsporników leży zarówno między podporami, jak i poza lewą i prawą podporą. Dlatego w określeniu „wspornik poza podporą" będzie zawsze sprecyzowane, poza którą podporą ten wspornik występuje (prawą czy lewą). Fragmenty prętów z maksymalnymi wartościami momentów od każdego przypadku obciążenia zostały oznaczone na rycinie 7 linią przerywaną po stronie rozciąganej oraz literą T, z trzonem T przecinającym pręt na końcu odcinka maksymalnego momentu i poprzeczką T po stronie rozciąganej. Przypadki obciążenia swobodnie podpartej belki obejmują:

- obciążenie na części niezawiniętej między podporami, na obu zawinięciach między podporami, na lewym wsporniku na prawo od linii lewej podpory i na prawym wsporniku na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na dole części niezawiniętej między punktami przyłączenia wsporników, ryc.7a);
- obciążenie na części niezawiniętej między podporami, na obu zawinięciach między podporami, na obu wspornikach na prawo od linii lewej podpory (daje maksymalne wartości momentów na dole części niezawiniętej między punktem przyłączenia prawego wspornika a linią prawej podpory, ryc.7b), odwrotnie w przypadku momentów na dole części niezawiniętej między punktem przyłączenia lewego wspornika a linią lewej podpory;
- obciążenie na obu zawinięciach poza podporami, na lewym wsporniku na lewo od linii lewej podpory i na prawym wsporniku na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na górze części niezawiniętej między punktami przyłączenia wsporników, ryc.7c);

Ryc. 6. Meble o schemacie niezawiniętej swobodnie podpartej belki i wsporników między i poza podporami: a) stół piknikowy, źródło: http://playtime.pl/produkt/1341/stol-piknikowy-metalowy/48; b) rzeczywisty i zastępczy schemat stołu z ryc. 6a; c) linia wpływu momentów na dole swobodnie podpartej belki między punktami przyłączenia wsporników z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; d) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole swobodnie podpartej belki między punktami przyłączenia wsporników; e) linia wpływu momentów na górze swobodnie podpartej belki między punktami przyłączenia wsporników z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; f) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na górze swobodnie podpartej belki między punktami przyłączenia wsporników; g) linia wpływu momentów na dole swobodnie podpartej belki między punktem przyłączenia prawego wspornika a prawą podporą z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; h) wykres momentów z zacieniowanymi maksymalnymi wartościami na dole swobodnie podpartej belki między punktem przyłączenia prawego wspornika a prawą podporą; i) linia wpływu momentów na górze swobodnie podpartej belki między punktem przyłączenia prawego wspornika a prawą podporą z najbardziej niekorzystnym obciążeniem grawitacyjnym; j) obwiednia momentów z ryc. 6d, 6f, 6h; k) forma stołu z ryc. 6a wynikająca z pracy konstrukcji; l) szezlong, projekt Sergio Fahrer, źródło: http://design.novoambiente.com/produto/chaise-paso-doble/; m)-n) szezlong, projekt Joel Escalona, źródło: http://www.tattoopinners.com/furniture-collection-from-joel-escalona-pics/yeeeeee.com*imagebank*Outdoors%20Furniture%20Collection*592921226555016.jpg/; o) stolik, projekt Alexander Kozynets , źródło: https://www.woont.com/de/Magazin/Wohnen/M%C3%B6bel/Reindeer-Desk-von-Alexander-Kozynets-36; p) ławka, projekt Joel Escalona, źródło: http://www.3lian.com/show/2010/09/4042.html, q) stolik, źródło: http://www.modhaus.com/detail.asp?id=15850; r) gazetnik, źródło: http://www.homebook.pl/produkty/3889312/dla-domu-do-salonu-gazetniki-stojak-na-gazety-edito; s) gazetnik, źródło: http://www.muji.com.pl/p-8779-16-63-1-Gazetownik,jesion.html. Rys. autorka

Fig. 6. Furniture of scheme of uncoiled simply supported beam and cantilevers between and beyond supports: a) picnic table, source: http://playtime.pl/produkt/1341/stol-piknikowy-metalowy/48; b) actual and corresponding scheme of the table from Fig. 6a; c) influence line of moments at the bottom of simply supported beam between attachment points of cantilevers with most unfavourable gravitational load; d) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of simply supported beam between attachment points of cantilevers; e) influence line of moments at the top of simply supported beam between attachment points of cantilevers with most unfavourable gravitational load; f) moment diagram with shaded maximum values at the top of simply supported beam between attachment points of cantilevers; g) influence line of moments at the bottom of simply supported beam between attachment point of right cantilever and right support with most unfavourable gravitational load; h) moment diagram with shaded maximum values at the bottom of simply supported beam between attachment point of right cantilever and right support; i) influence line of moments at the top of simply supported beam between attachment point of right cantilever and right support with most unfavourable gravitational load; j) envelope of moments from Fig. 6d, 6f, 6h; k) form of the table from Fig. 6a resulting from structural behaviour; l) chaise longue, design: Sergio Fahrer, source: http://design.novoambiente.com/produto/chaise-paso-doble/; m)-n) chaise longue, design: Joel Escalona, source: http://www.tattoopinners.com/furniture-collection-from-joel-escalona-pics/yeeeeee.com*imagebank*Outdoors%20Furniture%20Collection*592921226555016.jpg/; o) table, design: Alexander Kozynets, source: https://www.woont.com/de/Magazin/Wohnen/M%C3%B6bel/Reindeer-Desk-von-Alexander-Kozynets-36; p) bench, design: Joel Escalona, source: http://www.3lian.com/show/2010/09/4042.html; q) table, source: http://www.modhaus.com/detail.asp?id=15850; r) newspaper holder, source: http://www.homebook.pl/produkty/3889312/dla-domu-do-salonu-newspaper holderi-stojak-na-gazety-edito; s) newspaper holder, source: http://www.muji.com.pl/p-8779-16-63-1-Gazetownik,jesion.html. Fig. the author



Ryc. 7. Najbardziej niekorzystne przypadki obciążenia mebli o schemacie swobodnie podpartej belki z dwoma zawinięciami i z dwoma wspornikami przyłączonymi do części niezawiniętej belki (zawinięcia i wsporniki poza i między podporami), dające maksymalne wartości momentów na odcinkach prętów oznaczonych linią przerywaną i w przekrojach oznaczonych T lub ⊥. Rys. autorka
Fig. 7. Most unfavourable load cases of furniture with scheme of simply supported beam with two coiled parts and two cantilevers attached to uncoiled part of beam (coiled parts and cantilevers beyond and between supports), giving maximum moment values on segments highlighted by dashed line and in cross sections with T or ⊥. Fig. the author

Ryc. 8. Stolik o schemacie swobodnie podpartej belki z zawinięciami poza podporami i dwoma wspornikami między i poza podporami, projekt Chance Coalter, źródło: http://www.chancecoalter.com/#!entry-table/c1bce
Fig. 8. Table of scheme of simply supported beam with coiled parts beyond supports and two cantilevers between and beyond supports, design: Chance Coalter, source: http://www.chancecoalter.com/#!entry-table/c1bce

- obciążenie na obu zawinięciach poza podporami oraz na obu wspornikach na lewo od linii lewej podpory (daje maksymalne wartości momentów na górze części niezawiniętej między punktem przyłączenia prawego wspornika a linią prawej podpory, ryc.7d), odwrotnie w przypadku momentów na górze części niezawiniętej między punktem przyłączenia lewego wspornika a linią lewej podpory;
- obciążenie na lewym zawinięciu między podporami, na prawym zawinięciu poza podporą oraz na obu wspornikach na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów wewnątrz lewego zawinięcia poza podporą, ryc. 7e), odwrotnie w przypadku momentów wewnątrz prawego zawinięcia poza podporą;
- obciążenie na lewym zawinięciu poza podporą, na części niezawiniętej między podporami, na prawym zawinięciu między podporami oraz na obu wspornikach na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na zewnątrz lewego zawinięcia poza podporą, ryc. 7f), odwrotnie w przypadku momentów na zewnątrz prawego zawinięcia poza podporą;
- obciążenie na prawym zawinięciu poza podporą oraz na obu wspornikach na prawo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów wewnątrz lewego zawinięcia między podporami, ryc. 7g), odwrotnie w przypadku momentów wewnątrz prawego zawinięcia między podporami;
- obciążenie na lewym zawinięciu poza podporą i między podporami, na części niezawiniętej między podporami, na prawym zawinięciu między podporami oraz na obu wspornikach na lewo od linii prawej podpory (daje maksymalne wartości momentów na zewnątrz lewego zawinięcia między podporami, ryc. 7h), odwrotnie w przypadku momentów na zewnątrz prawego zawinięcia między podporami.

Najbardziej niekorzystne przypadki obciążeń wsporników z zawinięciami są przedstawione na rycinie 4 i omówione w rozdziale 1. Na rycinie 7 zostały tylko zaznaczone miejsca maksymalnych wartości momentów na wspornikach od podanych przypadków obciążenia belki. Najbardziej niekorzystne obciążenia swobodnie podpartej belki nie zależą od obecności lub braku zawinięć wsporników. Na przypadki obciążeń swobodnie podpartej belki ma wpływ tylko to, czy wsporniki są między i/lub poza liniami pionowymi podpór.

Dobranie optymalnej formy swobodnie podpartej belki stolika przedstawionego na rycinie 8 powinno być poprzedzone znalezieniem momentów od przypadków obciążeń a-f, przedstawionych na rycinie 7. Warianty obciążenia pokazane na rycinach 7g i 7h nie będą rozpatrywane, ponieważ stolik ten nie ma zawinięć swobodnie podpartej belki między podporami. Natomiast wartości momentów na zawiniętych wspornikach powinny być znalezione dla przypadków obciążeń przedstawionych na rycinie 4. Forma stolika umożliwia przyłożenie obciążeń na poziomych fragmentach wsporników oraz na części niezawiniętej swobodnie podpartej belki.

PODSUMOWANIE

W artykule zostały omówione zasady pracy zginanych konstrukcji mebli, których schematem statycznym są wsporniki połączone z zakrzywionymi swobodnie podpartymi belkami i których zasadnicze obciążenia są pionowe. Zbadano wpływ sposobów zakrzywienia prętów i cienkich płyt na warianty obciążeń, konieczne do uwzględnienia przy analizie tych mebli. Liczba najbardziej niekorzystnych przypadków obciążeń i ich charakter w przypadku swobodnie podpartej belki są zależne od obecności lub braku zawinięć tej belki oraz od położenia wsporników względem linii pionowych przechodzących przez podpory tej belki. Przypadki obciążenia wspornika zależą tylko od obecności lub braku jego zawinięć i nie mają żadnego związku ze swobodnie podpartą belką. Określono charakter zmian optymalnych wysokości prętów i grubości płyt tych mebli. Optymalne przekroje zawinięć swobodnie podpartej belki powinny być tym większe, im są bardziej oddalone od linii jej podpór. Każda część niezawinięta swobodnie podpartej belki pomiędzy linią podpory i punktem przyłączenia najbliższego wspornika powinna mieć najmniejszy przekrój na linii podpory i największy w miejscu przyłączenia wspornika (w rozgałęzionym węźle). Część niezawinięta swobodnie podpartej belki pomiędzy rozgałęzionymi węzłami powinna być albo o stałym przekroju, albo mieć największy przekrój w pobliżu środka (dokładnie w środku w przypadku mebli symetrycznych). Niezawinięte fragmenty wsporników powinny mieć coraz większy przekrój w kierunku ich utwierdzeń, a fragmenty zawinięte powinny mieć najmniejszy przekrój w miejscu o najmniejszej wartości momentów na zawinięciu od obciążeń na wszystkich częściach wspornika. W procesie projektowania mebli należy ponadto zwrócić szczególną uwagę na prawidłowe wykonanie węzłów, które często są słabymi miejscami konstrukcji mebli.

LITERATURA

1. **Allen A., Zalewski W. (2010),** *Form and forces: designing efficient, expressive structures*, Wiley, Hoboken NJ.
2. **Dyląg Z., Krzemińska-Niemiec E., Filip F. (1989)**, *Mechanika budowli. Tom.1,* PWN, Warszawa.
3. **Dyląg Z., Krzemińska-Niemiec E., Filip F. (1993)**, *Mechanika budowli. Tom 2,* Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok.
4. **Gere J. M., Timoshenko S.P. (1991)**, *Mechanics of Materials,* Springer, Dordrecht.
5. **Ghali A., Neville A. M., Brown T.G. (2009)**, *Structural Analysis. A unified classical and matrix approach,* Taylor & Francis, NY.
6. **Hartsuijker C., Welleman J. W. (2006),** *Engineering Mechanics Volume 1: Equilibrium,* Springer, Dordrecht.
7. **Hjelmstad K. D. (2005)**, *Fundamentals of Structural Mechanics*, Springer, NY.
8. **Kolendowicz T. (1977)**, *Mechanika budowli dla architektów,* Arkady, Warszawa.
9. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej,* „Architecturae et Artibus" nr 4.
10. **Kozikowska A. (2010)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji belkowej oraz ramowej*, „Architecturae et Artibus" nr 4.
11. **Kozikowska A. (2013)**, *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji płyt zginanych jednokierunkowo,* „Architecturae et Artibus" nr 1.
12. **Kozikowska A. (2013)**, *Forma a konstrukcja mebli. Stoły,* „Architecturae et Artibus" nr 3.
13. **Macdonald A. J. (2001)**, *Structure and Architecture*, Architectural Press, Oxford.
14. **Prakash Rao D. S. (1997)**, *Graphical methods in structural analysis,* Universities Press, Hyderabad.
15. **Siegel C. (1974)**, *Formy strukturalne w nowoczesnej architekturze*, Arkady, Warszawa.
16. **Shihua B., Yaoging G. (2008)**, *Structural Mechanics,* Wuhan University Press, Wuhan.
17. **Stadler W. (1988)**, *Natural Structural Shapes (A Unified Optimal Design Philosophy),* „Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences", Springer, NY.
18. **Timoshenko S. (1930)**, *Strength of materials. Part I. Elementary Theory and Problems,* D. Van Nostrand Company, NY.

ŹRÓDŁA INTERNETOWE

1. http://www.gradnja.rs/wp-content/uploads/2012/10/zanimljivi-radni-stolovi.jpg (ryc. 3a) [dostęp: 08-04-2015].
2. http://www.pinkertonmirrors.co.uk/stylish-designer-mirrored-coffee-table-59-p.asp (ryc. 3f) [dostęp: 08-04-2015].
3. http://bedzine.com/blog/bed-news/pointer-tables-complement-your-modern-bedroom/ (ryc. 3m) [dostęp: 08-04-2015].
4. http://www.luxlux.pl/artykul/stojak-na-gazety-kartell-16904 (ryc. 3n) [dostęp: 08-04-2015].
5. http://roomfu.com/2010/02/fab-finds-side-tables/ (ryc. 3o) [dostęp: 08-04-2015].
6. http://www.houzz.com/photos/5768479/Gus-Modern-Ossington-Coffee-Table-modern-coffee-tables (ryc. 3p) [dostęp: 08-04-2015].
7. http://cadieuxinteriors.ca/products/bolier-modern-luxury-biedermeier-stool (ryc. 3q) [dostęp: 08-04-2015].
8. http://designsandinteriors.com/furniture/sleek-futuristic-chair-furniture-design (ryc. 4t) [dostęp: 08-04-2015].
9. http://www.gr8lessons.com/design2/coffeetableDESIGNERS04.html (ryc. 5a) [dostęp: 08-04-2015].
10. http://www.etelinteriores.com.br/colecao_item.php?id_peca=252 (ryc. 5j) [dostęp: 08-04-2015].
11. http://www.buglo.pl/product/Stol-piknikowy-metalowy/?id=268 (ryc. 6a) [dostęp: 08-04-2015].
12. http://design.novoambiente.com/produto/chaise-paso-doble/ (ryc. 6l) [dostęp: 08-04-2015].
13. http://www.tattoopinners.com/furniture-collection-from-joel-escalona-pics/yeeeeee.com*imagebank*Outdoors%20Furniture%20Collection*592921226555016.jpg/ (ryc. 6m) [dostęp: 08-04-2015].
14. http://www.tattoopinners.com/furniture-collection-from-joel-escalona-pics/yeeeeee.com*imagebank*Outdoors%20Furniture%20Collection*592921226555016.jpg/ (ryc. 6n) [dostęp: 08-04-2015].
15. https://www.woont.com/de/Magazin/Wohnen/M%C3%B6bel/Reindeer-Desk-von-Alexander-Kozynets-36 (ryc. 6o) [dostęp: 08-04-2015].
16. http://www.3lian.com/show/2010/09/4042.html (ryc. 6p) [dostęp: 08-04-2015].
17. http://www.modhaus.com/detail.asp?id=15850 (ryc. 6q) [dostęp: 08-04-2015].
18. http://www.homebook.pl/produkty/3889312/dla-domu-do-salonu-gazetniki-stojak-na-gazety-edito (ryc. 6r) [dostęp: 08-04-2015].
19. http://www.muji.com.pl/p-8779-16-63-1-Gazetownik,jesion.html (ryc. 6s) [dostęp: 08-04-2015].
20. http://www.chancecoalter.com/#!entry-table/c1bce (ryc. 8) [dostęp: 08-04-2015].

Artykuł zrealizowano w ramach projektu badawczego S/WA/1/2011 Politechniki Białostockiej.