

Arnold Wilczyński, Marek R. Gogolin, Paweł Kwieciński
WSP w Bydgoszczy

BADANIE BELEK DWUTEOWYCH SKLEJONYCH Z DREWNA I SKLEJKI

1. Wstęp

Pomimo wprowadzania nowych, coraz doskonalszych materiałów konstrukcyjnych, drewno pozostaje nadal atrakcyjnym, wręcz niezastąpionym tworzywem w wielu dziedzinach produkcji materialnej. Przewodzą tu zwłaszcza budownictwo i meblarstwo. W masowej produkcji konstrukcji drewnianych ważną sprawą staje się zmniejszenie zużycia cennego surowca drzewnego osiągnięte przez odpowiednie, materiałoozczędne kształtowanie elementów konstrukcyjnych i zastępowanie drewna materiałami drewnopochodnymi.

Przykładem materiałoozczędnych elementów drewnianych są belki o przekroju złożonym – dwuteowym lub skrzynekowym. Takie elementy tych belek jak środnik lub ścianki boczne mogą być z powodzeniem wykonywane z płytowych materiałów drewnopochodnych. Stosunkowo niewielka grubość tych materiałów ułatwia optymalizację konstrukcji belek złożonych. Belki tego typu nie rozpowszechniły się w Polsce, przeważnie stosuje się elementy o tradycyjnym przekroju prostokątnym, wykonywane jako lite lub sklepane warstwowo z desek. Zapewne jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest brak szerszych krajowych badań wytrzymałościowych w tym zakresie.

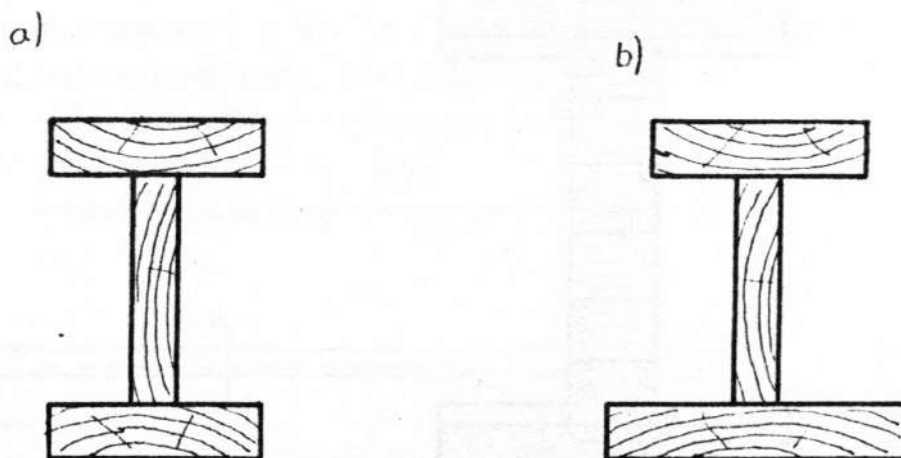
Badania nad tymi zagadnieniami podjęto w Instytucie Techniki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Bydgoszczy, zajmując się belkami dwuteowymi o pasach z drewna i środniku ze sklejk. Niniejsza praca zawiera opis pierwszego etapu tych badań.

2. Charakterystyka belek o przekroju dwuteowym

Belki należą do podstawowych elementów konstrukcyjnych w budownictwie drewnianym. Oprócz tradycyjnego i nadal powszechnego przekroju prostokątnego, belki drewniane mogą mieć przekroje złożone, takie jak: teowy, dwuteowy czy skrzynkowy. Stosowanie tych przekrojów pozwala na zmniejszenie ciężaru konstrukcji i jednocześnie efektywne wykorzystanie drewna.

Dążąc do zmniejszenia ciężaru oraz ze względu na oszczędność drewna elementy składowe belek o przekrojach złożonych wykonuje się z drewnopochodnych materiałów płytowych. Różnorodność, szeroki asortyment oraz dostępność tych materiałów stwarzają duże możliwości konstrukcyjne w tym zakresie. Łączenia elementów składowych belek o przekrojach złożonych dokonuje się za pomocą łączników mechanicznych lub kleju. Możliwe jest użycie obu tych sposobów jednocześnie.

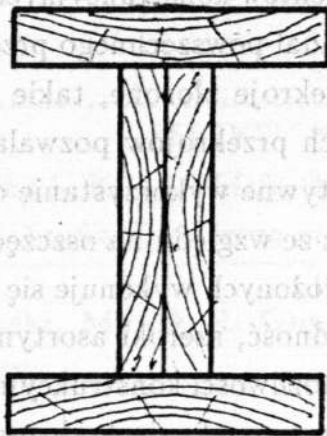
Belki o przekroju dwuteowym składają się z dwóch pasów: górnego i dolnego oraz środniczka. Najprostszym przykładem jest belka dwuteowa z desek klejonych na rąb (rys. 1). W celu zmniejszania zjawiska paczenia się drewna



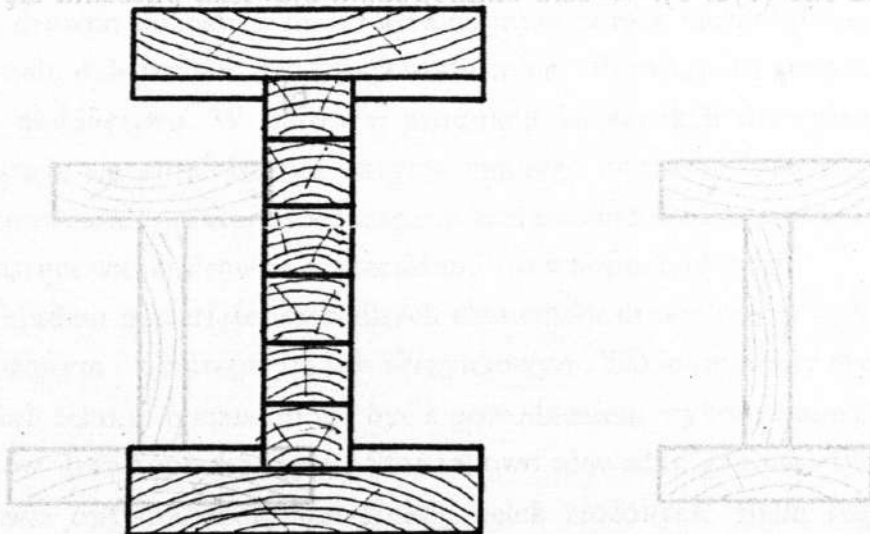
Rys. 1. Belka dwuteowa z desek na rąb: a) symetryczna, b) niesymetryczna

można zastąpić pojedynczą deskę środniczka dwiema deskami sklejonymi w sposób pokazany na rys. 2. Innym przykładem belki drewnianej o przekroju dwuteowym jest konstrukcja z desek klejonych warstwowo przedstawiona na rys. 3.

W belkach o przekroju dwuteowym środniczek można wykonać z drewnopochodnych materiałów płytowych, czego przykładem są belki przedstawione na rys. 4.

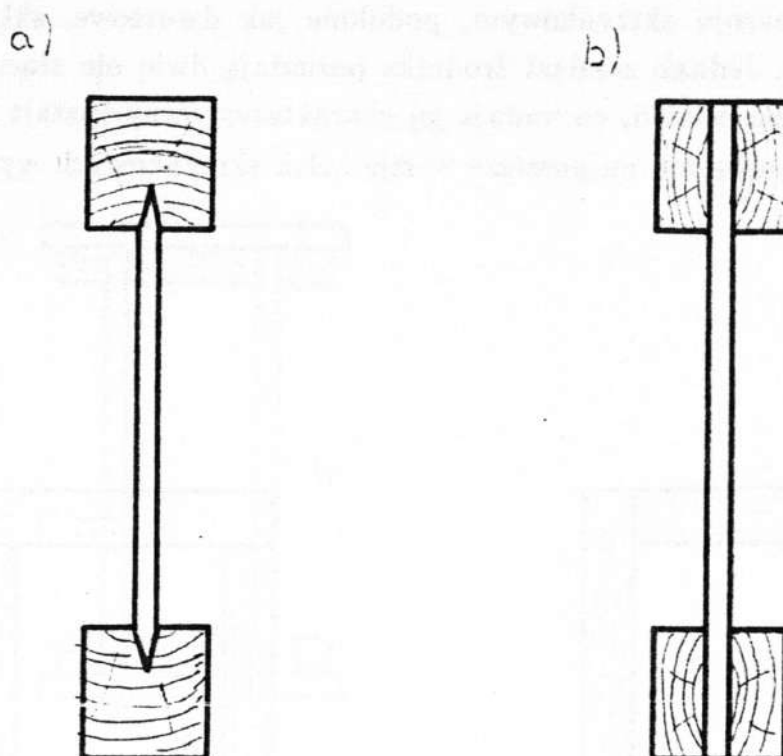


Rys. 2. Belka dwuteowa z podwójnym środkiem [1]



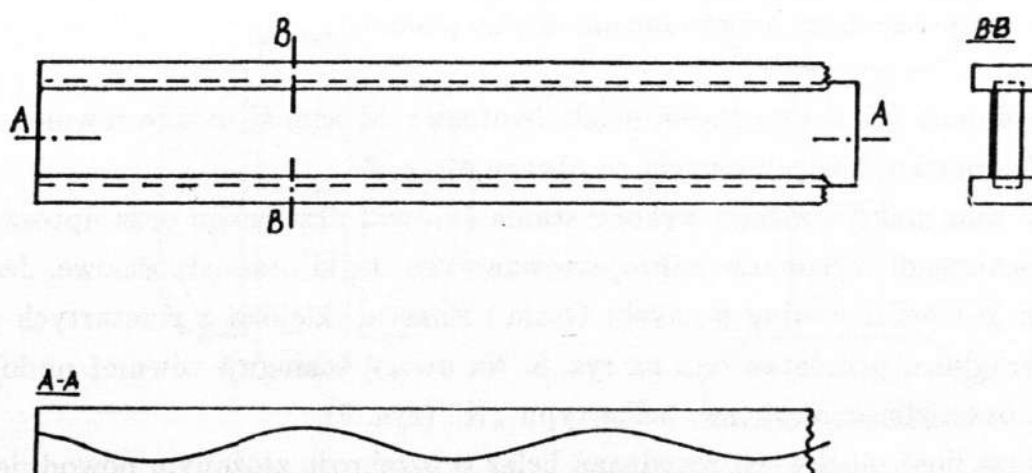
Rys. 3. Belka dwuteowa z desek klejonych warstwowo [13]

Ciekawym przykładem belki dwuteowej ze środkiem ze sklejki jest belka systemu Hessa (rys. 5). W jej pasach wyfrezowane są faliste rowki, w które wklejony jest środek z falistej sklejki. Rozwiązanie to znacznie zwiększa sztywność i ogranicza możliwość zwichrzenia, jest jednak skomplikowane pod względem technologicznym.



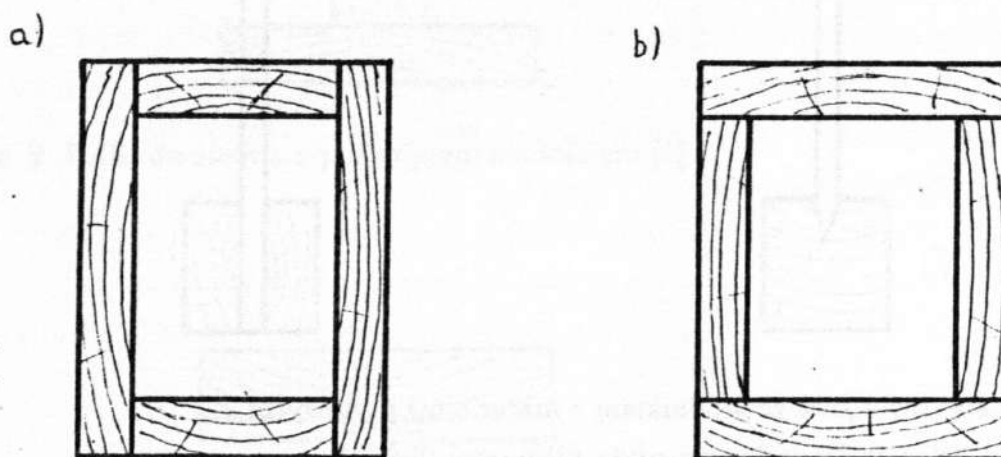
Rys. 4. Belki dwuteowe ze środnikiem z materia w pływowych:

- a) belka ze środnikiem z płyty pilśniowej twardej,
wklejonym w kątowe rowki w pasach [5],
- b) belka ze środnikiem ze sklejki
i doklejonymi do niego dwuczęściowymi pasami [2]



Rys. 5. Belka systemu Hessa ze środnikiem z falistej sklejki [1]

Belki o przekroju skrzynkowym, podobnie jak dwuteowe, składają się z dwóch pasów. Jednak zamiast środka posiadają dwie nie połączone bezpośrednio ze sobą ścianki, co nadaje jej charakterystyczny kształt skrzynki. Na rys. 6 przedstawiono najprostsze wersje belek skrzynkowych wykonanych z desek.

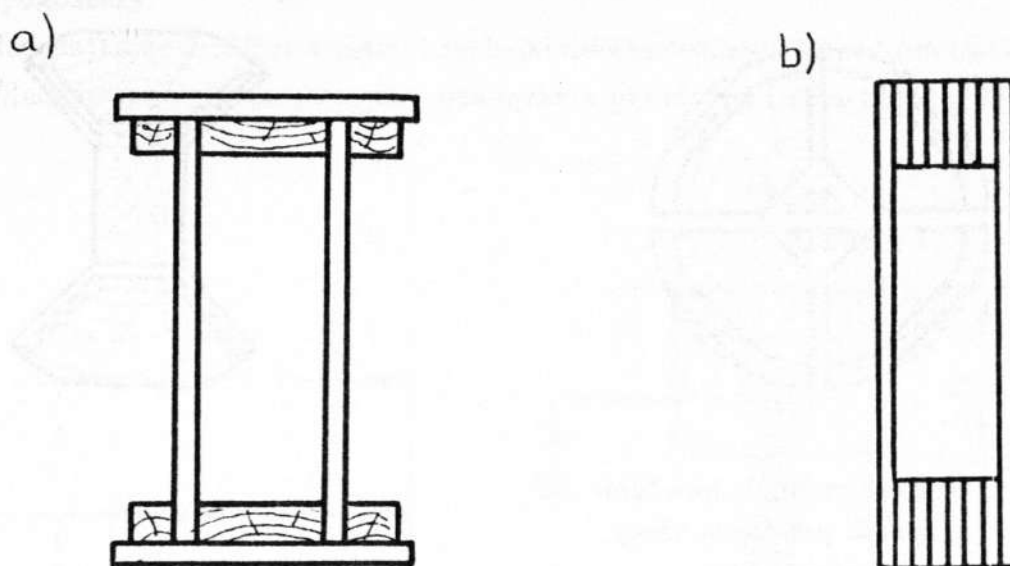


Rys. 6. Belki drewniane o przekrojach skrzynkowych:
 a) z pasami umieszczonymi między ściankami
 b) ze ściankami umieszczonymi między pasami

Podobnie jak w przypadku belek dwuteowych, ścianki można również wykonać z materiałów płytowych, co obrazuje rys. 7.

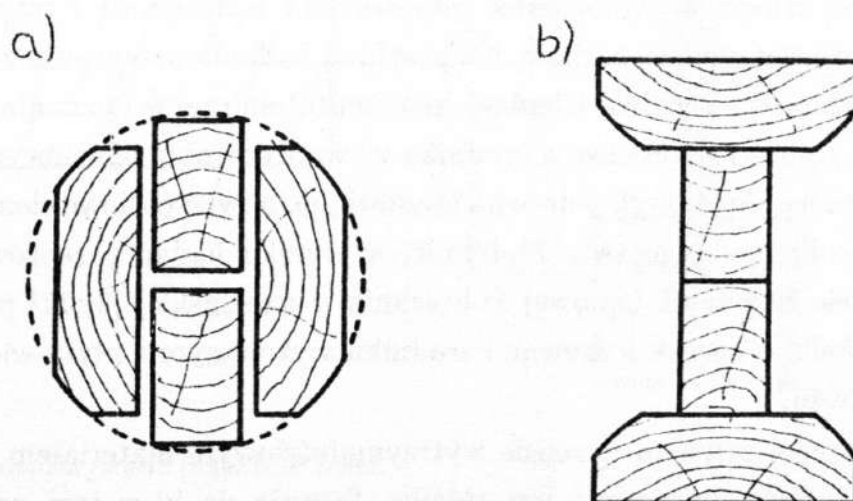
W celu maksymalnego wykorzystania surowca drzewnego oraz uproszczenia technologii wykonania zaprojektowano tzw. belki oszczędnościowe. Jedną z nich jest belka według pomysłu Grafa i Engera, sklejona z przetartych części okrągłaka, przedstawiona na rys. 8. Na uwagę zasługuje również podobna belka oszczędnościowa, tzw. belka typu „X” (rys. 9).

Duża ilość możliwych rozwiązań belek o przekroju złożonym powoduje, że trudno byłoby sporządzić szczegółową ich klasyfikację. Z tego powodu przedstawiono jedynie niektóre, zdaniem autorów ciekawsze, przypadki.



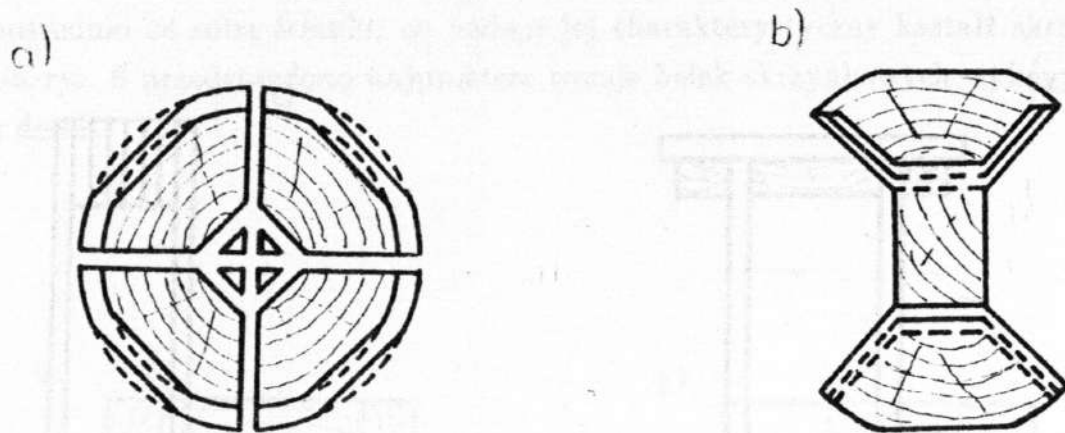
Rys. 7. Belki skrzynkowe ze ściankami z materiałów płytowych:

- a) ze ściankami wklejonymi w elementy pasów [3],
- b) z pasami (z desek klejonych warstwowo) oklejonymi ściankami sklejkowymi [12]



Rys. 8. Belka oszczędnościowa według pomysłu Grafa i Engera [1]:

- a) sposób przetarcia okrągłaka,
- b) zestawienie belki



Rys. 9. Belka oszczędnościowa typu „X”:

- a) sposób przetarcia kłody,
- b) zestawienie belki

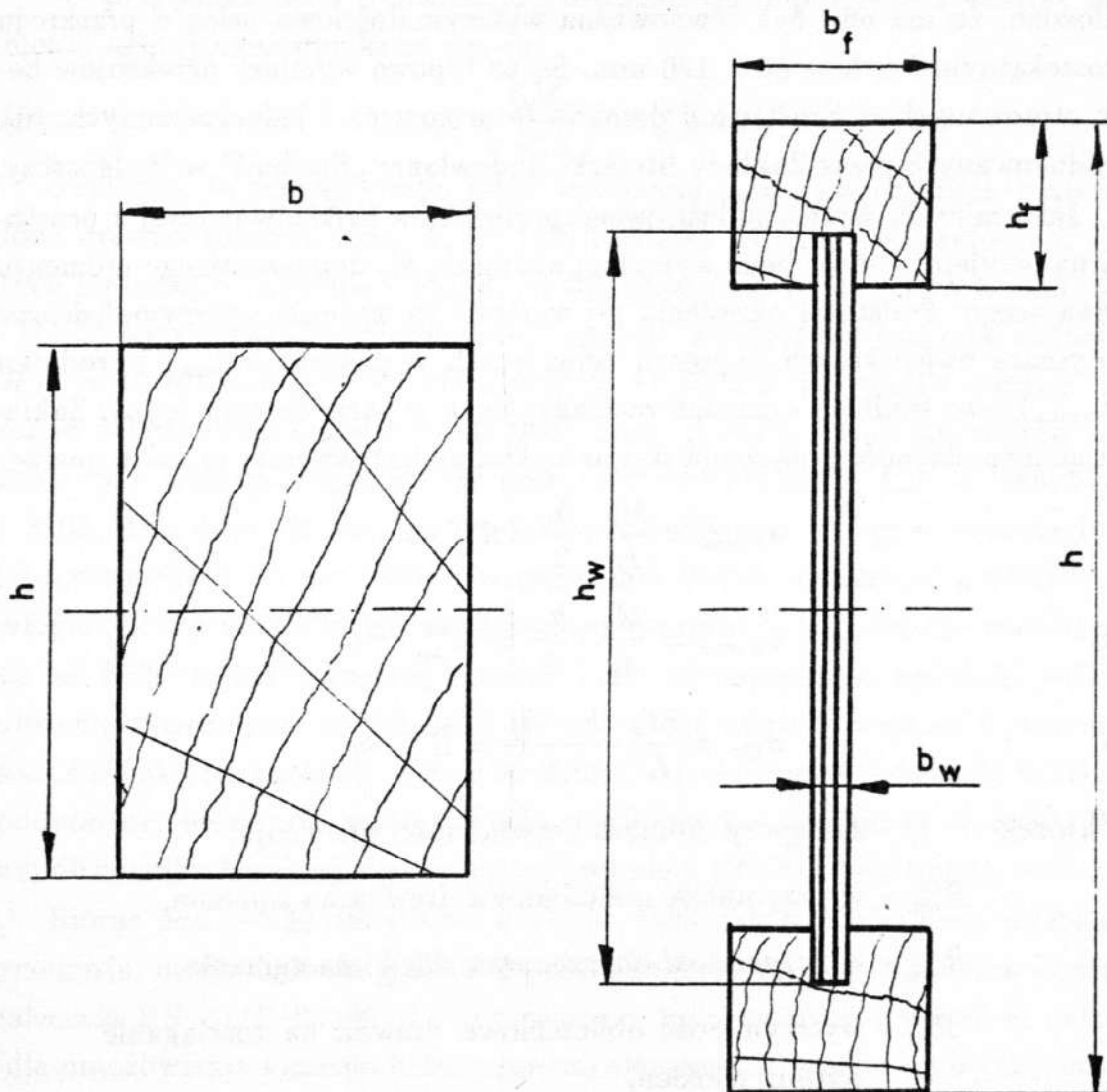
3. Przyjęcie konstrukcji i wymiarów belki

Szczególnie przydatne, zwłaszcza w drewnianym budownictwie małokubaturowym, powinny być belki o przekroju dwuteowym. Dzięki zastosowaniu na ich środniki stosunkowo cienkich płytowych tworzyw drzewnych można uzyskać bardzo lekkie, a jednocześnie wytrzymałe i sztywne, konstrukcje nośne stropów i dachów. Na przykład badania przeprowadzone w Katedrze Mechaniki i Techniki Ciepłej Akademii Rolniczej w Poznaniu [5, 6, 7, 8] wykazały, że belki dwuteowe o środniku z twardych płyt pilśniowych i łączonych z nimi na klej pasach z drewna stanowią pełnowartościowe elementy konstrukcyjne dla budownictwa. Podobnie, w wyniku badań przeprowadzonych w Instytucie Inżynierii Lądowej Politechniki Szczecińskiej [9, 11] pozytywnie oceniono belki o pasach z drewna i środniku wykonanym z płyty wiórowej lub paździerzowej.

Najbardziej pewnym w sensie wytrzymałościowym materiałem płytowym na środnik belki dwuteowej jest sklejka. Stosuje się ją w tym zakresie np. w USA w popularnym tam systemie drewnianych budowlanych elementów konstrukcyjnych ASI [10]. W Polsce raczej nie jest stosowana, nie przeprowadzono też dotąd w naszym kraju badań wytrzymałościowych dotyczących be-

lek dwuteowych ze środkiem ze sklejki. Chcąc wypełnić tę lukę, w 1990 roku rozpoczęto takie badania w Instytucie Techniki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Bydgoszczy.

Rozpatrując możliwe konstrukcje belki dwuteowej złożonej z drewna i sklejki, zdecydowano się na przyjęcie rozwiązania przedstawionego na rys. 10. Jest



Rys. 10. Rozpatrywane przekroje belek

ono wzorowane na amerykańskim systemie ASI. Środek jest wklejany w rowki wyfrezowane w pasach. Uzyskuje się więc połączenie klejowe wpustowo-wypustowe (tzw. własne pióro). Technologia wykonania takiej belki jest stosunkowo

prosta; w procesie klejenia nie są wymagane żadne urządzenia dociskowe. Zdaniem autorów, belka o przyjętej konstrukcji jest łatwiejsza do wykonania od alternatywnej belki, w której przedzielony na dwie części pas dokleja się do środka (patrz rys. 4b). Powinna być także bardziej niezawodna podczas eksploatacji.

W celu przyjęcia konkretnych wymiarów rozpatrywanej belki dwuteowej założono, że ma ona być równoważna wytrzymałościowo belce o przekroju prostokątnym $b \times h = 80 \times 120$ mm. Są to typowe wymiary przekrojów belek stosowanych w konstrukcji domków letniskowych i jednorodzinnych, np. produkowanych przez Zakłady Stolarki Budowlanej „Stolbud” w Bydgoszczy.

Jako miernik wytrzymałościowego porównania belki dwuteowej z prostokątną przyjęto nośność belki wyrażoną wartością M_d dopuszczalnego momentu zginającego. Podstawą określenia tej wartości są warunki wytrzymałościowe dotyczące największych naprężeń zginających w pasach ($\sigma_{f \max}$) i środku ($\sigma_{w \max}$) oraz średnich naprężeń rozciągających w pasie dolnym ($\sigma_{f \text{sr}}$). Zakładając niepodatność połączenia pasów ze środkiem warunki te mają postać:

$$(1) \quad \sigma_{f \max} = \frac{M_d}{I_z} \cdot \frac{h}{2} = R_{dm}^{\text{dr}} \cdot m,$$

$$(2) \quad \sigma_{w \max} = \frac{M_d}{I_z} \cdot \frac{h_w}{2} = R_{dm}^{\text{skl}} \cdot m,$$

$$(3) \quad \sigma_{f \text{sr}} = \frac{M_d}{I_z} \cdot \frac{h - h_f}{2} = R_{dt}^{\text{dr}} \cdot m,$$

w której: I_z – zastępczy moment bezwładności przekroju,

R_{dm}^{dr} – wytrzymałość obliczeniowa drewna na zginanie,

R_{dm}^{skl} – wytrzymałość obliczeniowa sklejki na zginanie,

R_{dt}^{dr} – wytrzymałość obliczeniowa drewna na rozciąganie wzdłuż włókien,

m – współczynnik korekcyjny.

Zastępczy moment bezwładności przekroju dwuteowego, po sprowadzeniu całego przekroju do drewna, wyraża się wzorem [15]:

$$(4) \quad I_z = I_f + I_w \frac{E_m^{\text{skl}}}{E_m^{\text{dr}}},$$

w którym: I_f, I_w – odpowiednio momenty bezwładności pasów i środka względem osi obojętnej przekroju,

E_m^{skl} – moduł sprężystości sklejk przy zginaniu w płaszczyźnie płyty,

E_m^{dr} – moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien.

W przypadku belki o przekroju prostokątnym dopuszczalna wartość momentu zginającego wynika ze wzoru:

$$(5) \quad \sigma_{\max} = \frac{6M_d}{bh^2} = R_{dm}^{dr} \cdot m.$$

Przyjęto, że rozpatrywane belki wykonane są z następujących materiałów: drewno sosnowe klasy K 27 (KS), sklejka liściasta wodoodporna. Dla tych materiałów, zgodnie z PN-81/B-03150.01 [15], występujące we wzorach (1)–(5) wytrzymałości obliczeniowe i moduły sprężystości osiągają wartości: $R_{dm}^{dr} = 13$ MPa, $R_{dt}^{dr} = 9,5$ MPa, $R_{dm}^{skl} = 11$ MPa w przypadku włókien obłogów sklejk równoległych do osi belki oraz 7,5 MPa dla prostopadłego ułożenia tych włókien względem osi belki, $E_m^{dr} = 9000$ MPa, $E_m^{skl} = 5000$ MPa i 3500 MPa odpowiednio dla środków o włóknach obłogów równoległych i prostopadłych do osi belki. Uwzględnienie dwóch wariantów usytuowania włókien obłogów sklejk jest uzasadnione. Wprawdzie ich ułożenie równoległe do osi belki zapewni większą nośność belki ze względu na zginanie, jednak ułożenie prostopadłe do osi belki też ma swoją zaletę – większą wytrzymałość środka na ściskanie w tym kierunku, co może mieć znaczenie w części podporowej belki przy występowaniu dodatkowego nacisku na tę część. Dla współczynnika korekcyjnego przyjęto, zgodnie z PN-81/B-03150.01, $m = 1$.

Biorąc pod uwagę dodatkowe kryteria, takie jak możliwie duża wysokość przekroju, możliwie mała grubość środka (ale nie mniejsza niż 8 mm według zalecenia PN-81/B-03150.01), odpowiednio duża szerokość i wysokość pasów (dla umożliwienia łączenia belek z innymi elementami konstrukcyjnymi), ustalono następujące wymiary przekroju dwuteowego: $b_w = 8$ mm, $h = 220$ mm, $h_w = 170$ mm, $b_f = 45$ mm i $h_f = 38$ mm. Dopuszczalne wartości momentu zginającego dla tak zwymiarowanej belki dwuteowej i dla porównawczej belki prostokątnej zestawiono w tabeli 1.

Jak widzimy, o nośności belki wyrażonej dopuszczalną wartością momentu zginającego decyduje rozciąganie pasa dolnego – gdy włókna obłogów sklejk

Tabela 1. Dopuszczalne wartości momentu zginającego dla belek o przekroju dwuteowym i prostokątnym

Rodzaj belki	Warunek wytrzymałościowy będący podstawą obliczenia	Dopuszczalne wartości momentu zginającego M_d w kNm
belka dwuteowa o włóknach oblogów sklejk równoległych do osi belki	zginanie pasów	3,46
	zginanie środника	3,78
	rozciąganie pasa	3,05
belka dwuteowa o włóknach oblogów sklejk prostopadłych do osi belki	zginanie pasów	3,39
	zginanie środnika	2,53
	rozciąganie pasa	3,00
belka o przekroju prostokątnym 80×120	zginanie belki	2,50

są równoległe do osi belki lub zginanie środnika – gdy włókna te są prostopadłe do osi belki. W tym drugim przypadku nośność belki dwuteowej jest w przybliżeniu równa nośności wyjściowej belki prostokątnej, natomiast w przypadku pierwszym – przewyższa ją. Traktując obydwie przypadki usytuowania oblogów włókien jako dopuszczalne, jako alternatywne w zależności od nacisku wywieranego na jej części podporowe, możemy ostatecznie stwierdzić, że przyjęta belka dwuteowa jest wytrzymałościowo – ze względu na nośność na zginanie – równoważna belce o przekroju prostokątnym 80×120 mm.

Poza zginaniem należy uwzględnić ścinanie belki dwuteowej oraz ścinanie spoiny klejowej łączącej pasy ze środkiem. Operując dopuszczalną wartością Q_d siły poprzecznej, możemy warunek wytrzymałościowy dotyczący ścinania przekroju poprzecznego przedstawić w postaci:

$$(6) \quad \tau_{\max} = \frac{Q_d S_z}{I_z b_w} = R_{dv90}^{\text{skl}} \cdot m,$$

w której: S_z – zastępczy moment statyczny połowy przekroju poprzecznego belki,

R_{dv90}^{skl} – wytrzymałość obliczeniowa sklejk na ścinanie.

Zastępczy moment statyczny oblicza się za pomocą wzoru [15]:

$$(7) \quad S_z = S_f + S_w \frac{E_m^{\text{skl}}}{E_m^{\text{dr}}},$$

w którym: S_f – moment statyczny pasa względem osi obojętnej przekroju dwuteowego,

S_w – moment statyczny połowy środka względem osi obojętnej przekroju dwuteowego.

Warunek wytrzymałościowy dotyczący ścinania spoiny klejowej ma postać:

$$(8) \quad \tau = \frac{Q_d S_f}{I_z l_s} = R_{dv}^s \cdot m,$$

w której: R_{dv}^s – wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie spoiny klejowej,
 l_s – długość „pracującej” spoiny (mierzona w przekroju poprzecznym) równa:

$$(9) \quad l_s = 2 \left[h_f - \frac{h - h_w}{2} \right].$$

Dla belki o przekroju prostokątnym dopuszczalna wartość siły poprzecznej wynika z warunku:

$$(10) \quad \tau_{\max} = \frac{3Q_d}{2bh} = R_{dv}^{dr} \cdot m,$$

w którym: R_{dv}^{dr} – wytrzymałość obliczeniowa drewna na ścinanie.

Przyjmując zgodnie z PN-81/B-03150 oraz [3], $R_{dv90}^{skl} = 2,2$ MPa, $R_{dv}^s = 1$ MPa, $R_{dv}^{dr} = 0,7$ MPa, obliczono na podstawie związków (6), (8) i (10) dopuszczalne wartości siły poprzecznej, które następnie zestawiono w tabeli 2. Wartości te są miarą nośności belek ze względu na ścinanie. Jak widzimy, nośność ta jest dla belki dwuteowej wyraźnie mniejsza niż dla prostokątnej, niemniej powinna być wystarczająca, szczególnie dla belek spełniających warunek $l/h > 10$, gdzie l – długość belki. Natomiast wyraźnie większa jest nośność belki dwuteowej wynikająca ze ścinania spoiny klejowej. Można więc uznać, że długość spoiny i związana z nią głębokość wpuszczenia w pasy są wystarczające.

Tabela 2. Dopuszczalne wartości siły poprzecznej dla belki o przekroju dwuteowym i prostokątnym

Rodzaj belki	Warunek wytrzymałościowy będący podstawą obliczenia	Dopuszczalna wartość Q_d siły poprzecznej w kN
dwuteowa	ścinanie belki	3,09
	ścinanie spoiny klejowej	4,38
prostokątna	ścinanie belki	4,48

4. Cel i zakres badań

Celem badań było poznanie właściwości mechanicznych belki dwuteowej z drewna i sklejk, o konstrukcji i wymiarach przedstawionych w punkcie 3. Badania obejmowały doświadczalne określenie sztywności i wytrzymałości do-
raźnej tej belki oraz porównanie jej rzeczywistych odkształceń z odkształce-
niami wyznaczonymi teoretycznie. Ponadto badaniami objęto równoważną wy-
trzymałościowo belkę o przekroju prostokątnym 80×120 mm, głównie w celu
porównania sztywności obu typów belek.

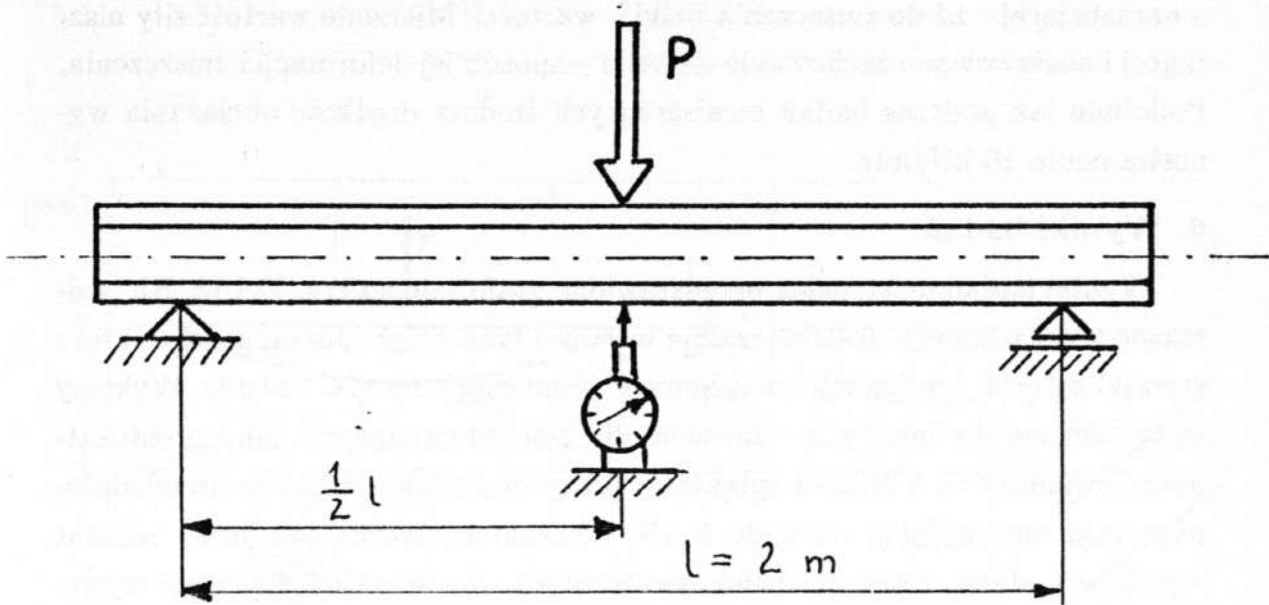
5. Opis badań

Do badań doświadczalnych przygotowano trzy jednakowe belki dwuteowe o długości 2,4 m. Pasy tych belek wykonano z drewna sosnowego klasy KS, środek – ze sklejki liściastej wodoodpornej siedmiowarstwowej o grubości 8 mm, zachowując równoległe usytuowanie obłogów sklejki względem osi belki. Do sklejenia pasów ze środkiem użyto żywicy fenolowo-formaldehydowej AG. Dużą wagę przykładano do jakości tego połączenia, starając się tak wyfrezo-
wać rowek w pasach, aby jego szerokość była o 0,1–0,2 mm większa od grubości sklejki.

Ponadto przygotowano z drewna sosnowego klasy KS trzy belki o przekroju prostokątnym 80×120 mm i długości 2,4 m. Przed przystąpieniem do badań zarówno belki dwuteowe jak i prostokątne sezonowano przez dwa tygodnie w pomieszczeniu laboratoryjnym, w którym wilgotność powietrza utrzymy-
wała się na poziomie $65 \pm 5\%$, zaś jego temperatura była równa 20 ± 1 °C.

Przyjęto, że próby zginania przeprowadzane będą za pomocą schematu: belka dwupodporowa obciążona siłą skupioną przyłożoną w połowie odległości między podporami (rys. 11). Do wywierania obciążenia i pomiaru jego war-
tości wykorzystano maszynę wytrzymałościową ZD 10/90 firmy Rauenstein, którą dostosowano do zginania długich belek przez zamocowanie w niej spe-
cjalnej konstrukcji w postaci kształtowego dźwigara stalowego o bardzo dużej sztywności. Pomiaru strzałki ugięcia badanych belek dokonywano za pomocą czujnika zegarowego (rys. 11), z dokładnością 0,01 mm.

Badanie sztywności belki, polegające na pomiarze jej ugięć, wymaga przy-
jęcia odpowiedniego zakresu obciążenia, przy którym mamy do czynienia z bez-
pieczną i sprężystą pracą belki. Przyjmując zarówno dla belki dwuteowej,



Rys. 11. Schemat obciążenia belki i pomiaru jej ugięcia

jak i porównawczej prostokątnej dopuszczalną wartość momentu zginającego równą 2,5 kNm (tabela 1) oraz uwzględniając sposób podparcia i obciążenia belek, otrzymujemy dopuszczalną wartość siły zginającej $P_d = 5 \text{ kN}$. W związku z tym przyjęto zmienność wartości obciążenia belek w przedziale od 0 do 5 kN.

Pomiaru ugięć belki dokonywano na kilku poziomach obciążenia, które narastało ze średnią prędkością około 10 kN/min. Po uzyskaniu obciążenia o wartości 1 kN i utrzymaniu go przez 10 sekund odczytywano ugięcie, po czym zwiększano stopniowo wartość obciążenia do poziomów 2; 3; 4; i 5 kN mierząc każdorazowo ugięcie po upływie 10 s od ustalenia danego poziomu. Powyższy cykl obciążenia belki powtarzano czterokrotnie, a następnie biorąc pod uwagę wyniki z trzech ostatnich cykli obliczano średnie wartości ugięć. Po wykonaniu opisanej serii pomiarów belkę obracano o 180° wokół jej osi i powtarzano badanie ugięć w ten sam sposób. Jako ostateczną wartość ugięcia belki przy danym poziomie siły obciążającej przyjmowano średnią arytmetyczną z ugięć odpowiadających pierwszemu i drugiemu, obróconemu o 180° , ustawieniu belki.

Po przeprowadzeniu prób obciążenie – odkształcenie w zakresie sprężystej pracy belek przystąpiono do prób niszczących, obciążając belki dwuteowe siłą

o narastającej – aż do zniszczenia belki – wartości. Mierzono wartość siły niszczącej i obserwowano zachowanie się belki – sposób jej deformacji i zniszczenia. Podobnie jak podczas badań nieniszczących średnia prędkość obciążania wynosiła około 10 kN/min.

6. Wyniki badań

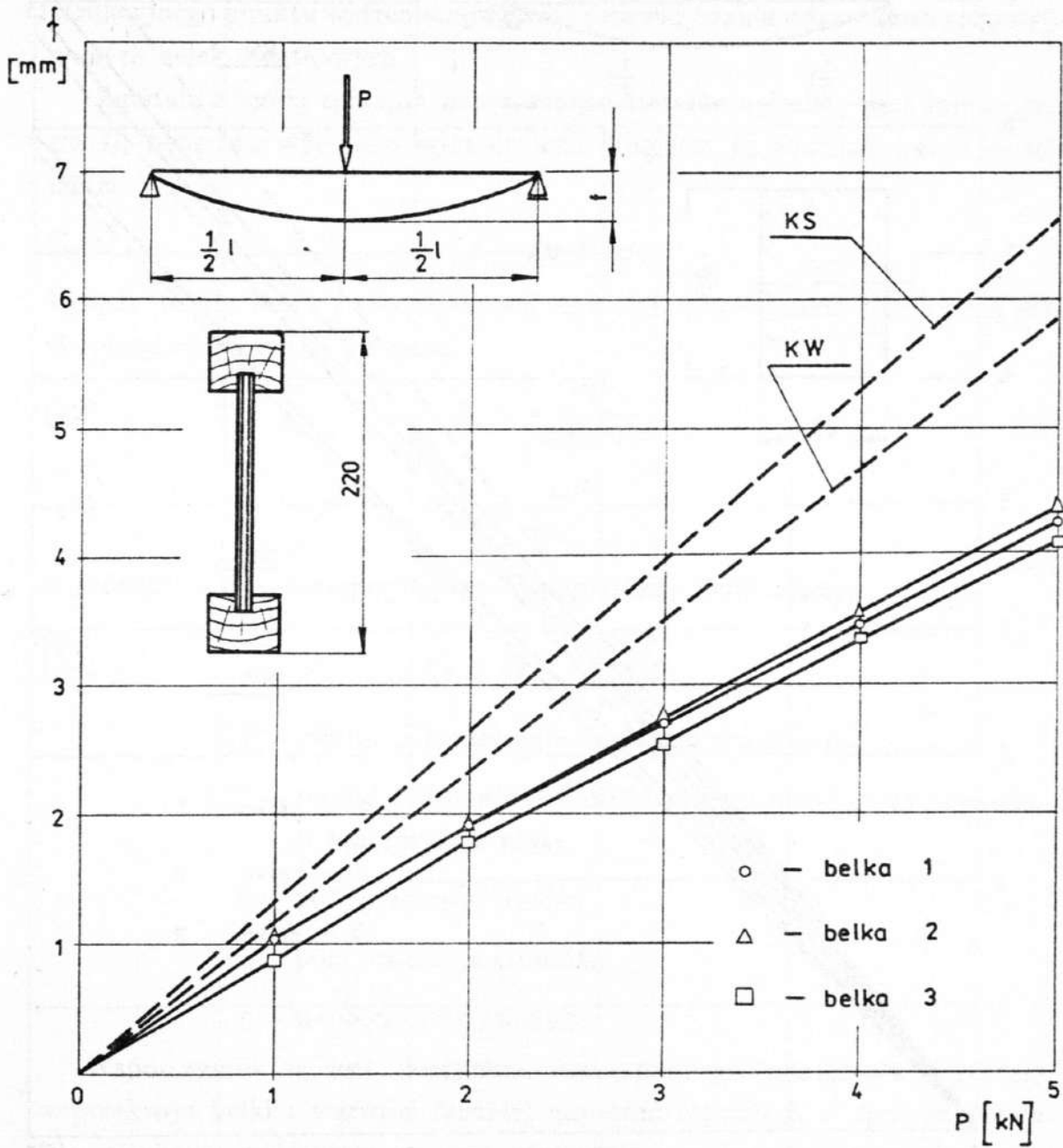
Wyniki badań ugięć belek przedstawiono graficznie na rys. 12 i 13. Na podstawie wyznaczonych doświadczalnie wartości tych ugięć sporządzono wykresy strzałki ugięcia f w funkcji obciążenia P (linie ciągłe na rys. 12 i 13). Wykresy te są zbliżone do liniowych – zarówno dla belek dwuteowych, jak i prostokątnych. Świadczy to o liniowo-sprężystej pracy materiałów belek w uwzględnionym zakresie obciążeń od 0 do 5 kN. Charakterystyczny jest mały rozrzut wyników badania ugięć dla belek dwuteowych. Na przykład dla ugięć wywołanych obciążeniem o wartości 5 kN współczynnik zmienności jest równy 3,5% (tabela 3), podczas gdy dla porównawczych belek prostokątnych jest on ponad dwukrotnie większy (tabela 4).

Tabela 3. Porównanie ugięć belek dwuteowych wywołanych obciążeniem $P = 5$ kN

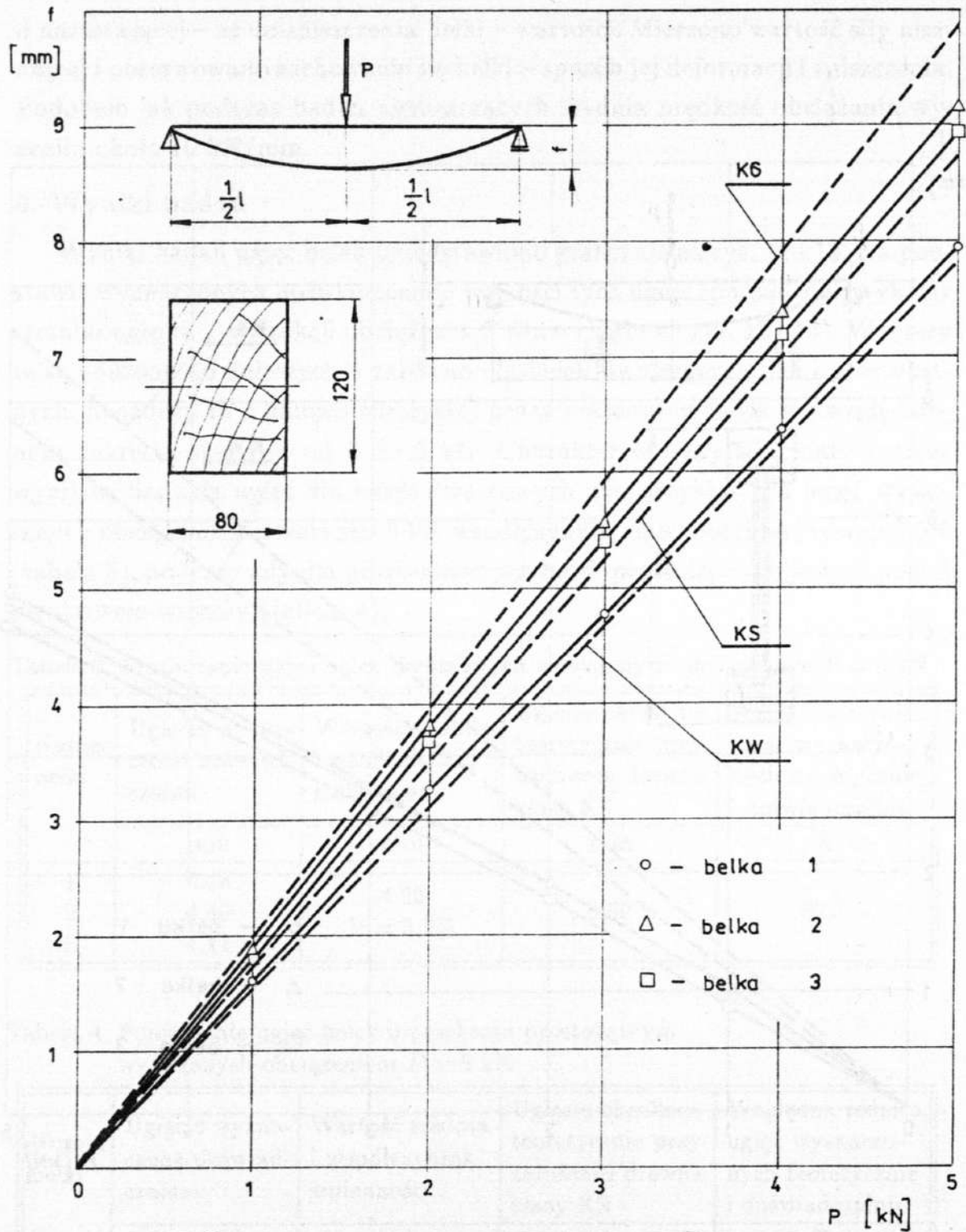
Numer belki	Ugięcie wyznaczone doświadczalnie	Wartość średnia i współczynnik zmienności	Ugięcie określone teoretycznie przy założeniu drewna klasy KS	Względna różnica ugięć wyznaczonych teoretycznie i doświadczalnie
	mm	mm	mm	%
1	4,28	4,26 $V = 3,5\%$	6,50	52,6
2	4,40			
3	4,11			

Tabela 4. Porównanie ugięć belek o przekroju prostokątnym wywołanych obciążeniem $P = 5$ kN

Numer belki	Ugięcie wyznaczone doświadczalnie	Wartość średnia i współczynnik zmienności	Ugięcie określone teoretycznie przy założeniu drewna klasy KS	Względna różnica ugięć wyznaczonych teoretycznie i doświadczalnie
	mm	mm	mm	%
1	7,95	8,70 $V = 7,6\%$	8,73	0,3
2	8,96			
3	9,19			



Rys. 12. Ugięcia belek dwuteowych: wyznaczone teoretycznie przy założeniu różnych klas jakości drewna zastosowanego na pasy (linie przerywane) i doświadczalnie (linie ciągłe)



Rys. 13. Ugięcia belek o przekroju prostokątnym: wyznaczone teoretycznie przy założeniu różnych klas jakości drewna zastosowanego na pasy (linie przerywane) i doświadczalnie (linie ciągłe)

Ważne jest porównanie wyznaczonych eksperymentalnie, a więc rzeczywistych ugięć belek z ugięciami obliczonymi teoretycznie na podstawie teorii zginania sprężystego. W przypadku ich zgodności uzyskalibyśmy istotną z konstrukcyjnego punktu widzenia możliwość przewidywania odkształceń rozpatrywanych belek dwuteowych.

Zgodnie z teorią zginania poprzecznego strzałka ugięcia f jest sumą ugięcia f_M będącego wynikiem zginania belki i ugięcia f_Q wynikającego z jej ścinania:

$$(11) \quad f = f_M + f_Q.$$

Ugięcia te dla belki dwupodporowej zginanej symetrycznie przyłożoną siłą skupioną określone są wzorami:

$$(12) \quad f_M = \frac{Pl^3}{48E_m^{\text{dr}}I_z},$$

$$(13) \quad f_Q = \frac{\alpha Pl}{4G_m^{\text{dr}}F_z},$$

w których: F_z – zastępczy przekrój poprzeczny belki równy:

$$(14) \quad F_z = F_f + F_w \frac{G_m^{\text{skl}}}{G_m^{\text{dr}}},$$

G_m^{dr} – moduł odkształcenia postaciowego drewna,

G_m^{skl} – moduł odkształcenia postaciowego sklejk przy zginaniu w płaszczyźnie płyty,

F_z – pole przekroju pasów,

F_w – pole przekroju środka,

α – współczynnik ścinania.

Współczynnik α jest iloczynem maksymalnego naprężenia stycznego w przekroju belki i wartości średniej naprężeń stycznych w tym przekroju. Dla przekroju prostokątnego jest równy 1,5 [14], natomiast w przypadku przekrojów dwuteowych osiąga znacznie większe wartości. Dla przyjętych przez nas wymiarów przekroju dwuteowego i wartości normowych (według PN-81/B-03150) modułów sprężystości i modułów odkształcenia postaciowego drewna i sklejk uzyskano $\alpha = 3,27$.

Biorąc pod uwagę przyjęte materiały belek (drewno klasy KS i sklejka liściasta wodoodporna), dla których zgodnie z normą PN-81/B-03150 [15]: $G_m^{dr} = 550$ MPa, $G_m^{skl} = 500$ MPa, otrzymujemy na podstawie wzorów (11)-(13) następujące wartości strzałki ugięcia odpowiadające obciążeniu 5 kN:

- dla belki dwuteowej

$$f = f_M + f_Q = 3,16 + 3,34 = 6,50,$$

- dla belki prostokątnej

$$f = f_M + f_Q = 8,03 + 0,70 = 8,73.$$

Porównanie tych wartości z ugięciami rzeczywistymi dokonano za pomocą tabel 3 i 4. O ile w przypadku belek prostokątnych zgodność teoretycznej i średniej rzeczywistej strzałki ugięcia jest bardzo dobra, o tyle dla belek dwuteowych strzałka teoretyczna jest znacznie, o ponad 50% większa od rzeczywistej.

Tak duża niezgodność rozpatrywanych ugięć belki dwuteowej może być spowodowana dwoma przyczynami. Po pierwsze, w obliczeniach korzystano z normowych wartości stałych sprężystości drewna i sklejki. Zapewne wartości te różnią się od rzeczywistych stałych sprężystości materiałów, z których wykonano badane belki. Zastrzeżenia budzi szczególnie normowa wartość modułu G_m^{dr} , naszym zdaniem jest ona znacznie zaniżona. Po drugie, wzór (13) wyprowadzony jest przy założeniu swobodnej deplanacji przekrojów poprzecznych w wyniku ścinania belki. W rzeczywistości przekrój środkowy belki nie ulega deplanacji, pozostaje płaski i, jak zauważają Timoshenko i Gere [14], ze względu na ciągłość odkształceń sąsiadujące z nim przekroje doznają mniejszych odkształceń wywołanych ścinaniem niż przekroje dalej położone. To ograniczenie swobody deformacji w środkowej części belki powoduje jej „usztynianie” się i w efekcie ugięcie obliczone za pomocą wzoru (13) jest zawyżone.

Ze względu na potrzebę ustalenia zweryfikowanego, pozwalającego na uzyskanie prawdziwych wartości, wzoru na strzałkę ugięcia belki dwuteowej o rozpatrywanej konstrukcji należałoby w dalszych poszerzonych badaniach wytrzymałościowych tego typu belek korzystać z rzeczywistych, wyznaczonych w dodatkowych badaniach eksperymentalnych wartości stałych sprężystości

materiałów belek.

W celu pełniejszego porównania ugięć wyznaczonych teoretycznie i doświadczalnie na rys. 12 i 13 naniesiono linią przerywaną wykresy teoretyczne nie tylko dla belek wykonanych z drewna klasy KS, lecz również dla belek zawierających drewno innych możliwych klas jakości.

Rozpatrywana przez nas belka dwuteowa jest wytrzymałościowo, w sensie nośności, równoważna belce o przekroju prostokątnym 80×120 mm. Ciekawe będzie porównanie sztywności tych belek, którego możemy dokonać przez zestawienie ich rzeczywistych strzałek ugięcia. Uwzględniając wartości strzałek wywołanych siłą o wartości 5 kN, otrzymujemy:

$$\frac{\text{sztywność belki dwuteowej}}{\text{sztywność belki prostokątnej}} = \frac{1}{4,26} : \frac{1}{8,70} = 2,04.$$

A więc belka dwuteowa jest ponad dwukrotnie sztywniejsza od odpowiadającej jej wytrzymałościowo belki prostokątnej.

Tabela 5. Wyniki badań niszczących belek dwuteowych

Numer belki	Wartość siły niszczącej P_n	Wartość momentu niszczącego M_n	Wytrzymałość umowna R_u	Opis deformacji i zniszczenia belki
	kN	kNm	MPa	
1	12,5	6,25	23,5	zwichrzenie belki, rozłupanie pasa górnego
2	11,6	5,80	21,8	zwichrzenie belki, rozłupanie pasa dolnego
3	13,3	6,65	25,0	j.w.
Wartość średnia	12,5 $V = 6,8\%$	6,23	23,4	

Wyniki badań niszczących belek dwuteowych zestawiono w tabeli 5. Poza wartością siły niszczącej P_n podano w niej wartość momentu niszczącego M_n , tzn. momentu zginającego wywołanego przez siłę P_n oraz wytrzymałość umowną R_u belki. Obliczono je za pomocą wzorów:

$$(15) \quad M_n = \frac{P_n l}{4},$$

$$(16) \quad R_u = \frac{M_n}{W_z},$$

w których: W_z – wskaźnik wytrzymałościowy przekroju dwuteowego na zginanie, równy:

$$(17) \quad W_z = \frac{2I_z}{h}.$$

Ponadto w tabeli 5 przedstawiono opis deformacji i zniszczenia badanych belek.

Wartości obciążenia niszczącego charakteryzują się stosunkowo niedużym rozrzutem, współczynnik zmienności jest równy 6,8%. Przyjmując 2,5 kNm jako dopuszczalną wartość momentu zginającego (punkt 5) i wprowadzając współczynnik bezpieczeństwa belki wyrażony jako iloraz momentu niszczącego i dopuszczalnego otrzymujemy średnią wartość tego współczynnika równą 2,5. Gdyby zwiększyć wartość momentu dopuszczalnego do 3,05 kNm (tabela 1), otrzymalibyśmy współczynnik bezpieczeństwa równy 2,0. Wydaje się, że pierwszą z przytoczonych wartości współczynnika bezpieczeństwa można uznać za wystarczającą. Wytrzymałość umowną belki trudno porównywać z parametrami normowymi drewna, niemniej warto zauważyć, że jest ona zbliżona do wytrzymałości charakterystycznej drewna klasy KS (K 27).

Zniszczenie belek następowało przez rozłupanie pasa górnego lub dolnego w następstwie zwiczenia środka, które uwidaczniało się przy osiągnięciu przez siłę zginającą poziomu 10 kN. W żadnej z belek nie stwierdzono zniszczenia spoiny klejowej łączącej pasy ze środkiem.

7. Podsumowanie

Badania eksperymentalne przeprowadzone na przedstawionych w pracy belkach dwuteowych złożonych z drewna i sklejki wykazały poprawność konstrukcji tych belek. W przyjętym zakresie obciążeń bezpiecznych (0–5 kN) zachowują się one jak układ liniowo sprężysty, charakteryzując się małym, jak dla elementów drewnianych, rozrzutem wyników.

Badaniami objęto również belki prostokątne równoważne wytrzymałościowo, ze względu na nośność, belkom dwuteowym. Z porównania ich strzałek ugięcia wynika, że sztywność belek dwuteowych jest ponad dwukrotnie większa niż prostokątnych.

Wytrzymałość rozpatrywanych belek dwuteowych można uznać za wystarczającą. Średnia wartość współczynnika bezpieczeństwa tych belek wyrażona

jako stosunek momentu niszczącego do momentu dopuszczalnego wynosi 2,5. Charakterystyczny jest niewielki rozrzut wytrzymałości. Zniszczenie belki następowało przez rozłupanie jednego z pasów w wyniku zwiczenia środka. Natomiast spoina klejowa pozostawała nienaruszona, co świadczy o poprawności zastosowanego klejowego połączenia wpustowo-wypustowego środka z pasami.

Ugięcia belek porównano z ugięciami wyznaczonymi na podstawie wzorów teoretycznych, w których uwzględniono normowe (według PN-81/B-03150) wartości modułów sprężystości drewna i sklejk. Stwierdzono dużą niezgodność tych ugięć. Wyznaczona teoretycznie strzałka ugięcia jest o ponad 50% większa od rzeczywistej. Jedną z przyczyn tej niezgodności jest operowanie normowymi parametrami materiałowymi, które zapewne różnią się od rzeczywistych parametrów materiałów użytych do wykonania belek. Ze względu na potrzebę ustalenia wzorów pozwalających przewidywać ugięcia rozpatrywanych belek dwuteowych należałoby w dalszych badaniach nad tymi belkami uwzględnić rzeczywiste właściwości mechaniczne ich materiałów.

Przedstawione badania należy traktować jako wstępne, wskazujące na poprawność pracy, na dobre właściwości mechaniczne rozpatrywanej klejonej belki dwumateriałowej. Biorąc pod uwagę prostotę konstrukcji i wykonania tej belki wskazane jest przeprowadzenie dalszych, poszerzonych badań wytrzymałościowych. W badaniach tych należałoby uwzględnić różne wymiary przekroju poprzecznego, szczególnie jego różne wysokości. Ważnym elementem badań, ze względu na to, że drewno i sklejka są materiałami lepkosprężystymi, powinny być odpowiednie próby reologiczne.

LITERATURA

1. J. Czechowicz: Konstrukcje drewniane klejone. Warszawa 1960 Arkady
2. P. Dutko: Drevene konstrukcie. Bratislava 1979 Slovenska Vysoka Škola Technicka
3. Z. Dziarnowski, W. Michniewicz: Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Warszawa 1974 Arkady

4. Z. Dziarnowski, Z. Mielczarek: Zastosowanie drewna i materiałów drewnopochodnych w budownictwie polskim i za granicą. *Prace Naukowe* nr 234 Politechnika Szczecińska s. 11–18
5. R. Ganowicz, K. Kwiatkowski: Badania belek drewnianych o środnikach z twardych płyt pilśniowych. *Inżynieria i budownictwo* nr 1 1985 s. 10–14
6. R. Ganowicz: Zastosowanie płyt pilśniowych twardych w nośnych konstrukcjach budowlanych. W: Materiały sesji naukowej z okazji 35-lecia studiów technologii drewna w Poznaniu. Poznań 1986
7. R. Ganowicz, T. Dziuba, K. Kwiatkowski: Belki dwuteowe ze środnikiem z twardych płyt pilśniowych. *Inżynieria i budownictwo* nr 2 1990 s. 47–49
8. R. Ganowicz i inni: Untersuchungen an Verbundträgern aus Vollholz und Hartfaserplatten. *Bauplanung-Bautechnik* nr 9 1990 s. 408–409
9. L. Kolczyński, Z. Mielczarek: Badania dźwigarów z drewna i płyt wiórowych pod obciążeniem krótkotrwałym i długotrwałym. *Prace Naukowe* nr 234 1983 Politechnika Szczecińska s. 209–219
10. Materiały informacyjne firmy Alpine Engineered Products Inc., Wood Products Division. Oxford North Carolina USA
11. Z. Mielczarek: Dźwigary o kształtach trapezowych dwuspadowych o pasach z drewna i środnikach z płyt paździerzowych. W: Materiały sympozjum nt. „Badania nad zastosowaniem drewna i materiałów drewnopochodnych we współczesnych konstrukcjach drewnianych”. Szczecin 1978
12. A. Oberlein: Langzeitverhalten von phenolverleimten Holzspanplatten. *Bauen mit Holz* nr 5 1984 s. 304–305
13. W. Rug: Stand und Entwicklungstendenzen in Holzbau. *Holztechnologie* nr 6 1984 s. 281–297
14. S. P. Timoshenko, J. M. Gere: Mechanics of materials. New York 1972 Van Nostrand Reinhold Company
15. PN-81/B-03150. Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statystyczne i projektowanie.

Arnold Wilczyński, Marek R. Gogolin, Paweł Kwieciński

TESTING OF "DOUBLE-T" CONSTRUCTION BEAMS GLUED OF WOOD AND PLYWOOD

Summary

In this paper testing of "double-T" construction beams was commented. "Double-T" beams were tested and compared to strength and rigidity of rectangular beams (made of solid wood). Rigidity of "double-T" beams is higher of rigidity of rectangular beams, and strengths of these beams are equivalent. These tests are first step to complex tests of strength, rigidity and other mechanical properties of "double-T" construction beams.