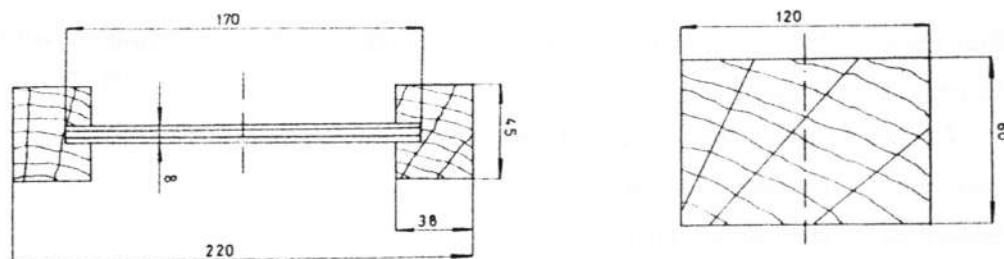


PAWEŁ KWIECIŃSKI
KRZYSZTOF WARMBIER
ARNOLD WILCZYŃSKI

WPLYW PODZIAŁU ŚRODNICA NA SZTYWNOŚĆ I WYTRZYMAŁOŚĆ BELEK DWUTEOWYCH Z DREWNA I SKLEJKI

1. Wstęp

Dążenie do zmniejszenia ciężaru drewnianych elementów konstrukcyjnych, a tym samym do zmniejszenia zużycia surowca drzewnego jest przyczyną poszukiwania nowych rozwiązań w budownictwie. Przykładem materiałooszczędnych elementów konstrukcyjnych są belki drewniane o przekrojach złożonych - dwuteowym lub skrzynkowym. Kształt przekroju tych belek w połączeniu z zastosowaniem płytowych materiałów drewnopochodnych, takich jak: sklejka, płyta wiórowa i płyta pilśniowa, umożliwia znaczne zmniejszenie ciężaru belek przy zachowaniu ich dostatecznej wytrzymałości i sztywności.



Rys. 1. Belka prostokątna i odpowiadająca jej belka o przekroju dwuteowym [5]

W Instytucie Techniki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Bydgoszczy poddano badaniom belkę o przekroju dwuteowym, odpowiadającą typowej belce drewnianej o przekroju prostokątnym (rys. 1) [5]. Środek belki dwuteowej wykonano ze sklejki i wklejono w prostokątne rowki wyfrezowane w drewnianych pasach. Obliczenia wytrzymałościowe wskazywały na znacznie większą sztywność belki dwuteowej niż prostokątnej, przy ich jednakowej nośności. Badania eksperymentalne polegały na określeniu sztywności obu typów belek oraz określeniu wytrzymałości doraźnej belki dwuteowej. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały liniowo-sprężystą pracę belki dwuteowej w pełnym zakresie przewidzianych dla niej obciążeń. Wytrzymałość zaś uznano za wystarczającą, przy założeniu współczynnika bezpieczeństwa - tj. stosunku momentu niszczącego do momentu dopuszczalnego - równego 2.5. Na uwagę zasługuje także niewielki rozrzut wyników zarówno przy badaniu sztywności, jak i wytrzymałości doraźnej.

Do rozpatrzenia pozostało szereg problemów materiałowych i konstrukcyjnych. Stąd też celowe wydaje się kontynuowanie badań belek dwuteowych o środku ze sklejki.

2. Cel i zakres badań

Jednym z czynników konstrukcyjnych mogących mieć wpływ na właściwości mechaniczne belki dwuteowej z drewna i sklejki jest podział środka na odcinki. W praktyce sytuacja taka zachodzić będzie wtedy, gdy długość belki jest większa niż długość arkusza sklejki. Konsekwencją tego czynnika jest następny, polegający na ewentualnym wzmocnieniu miejsca podziału środka poprzez doklejenie nakładki [1,2].

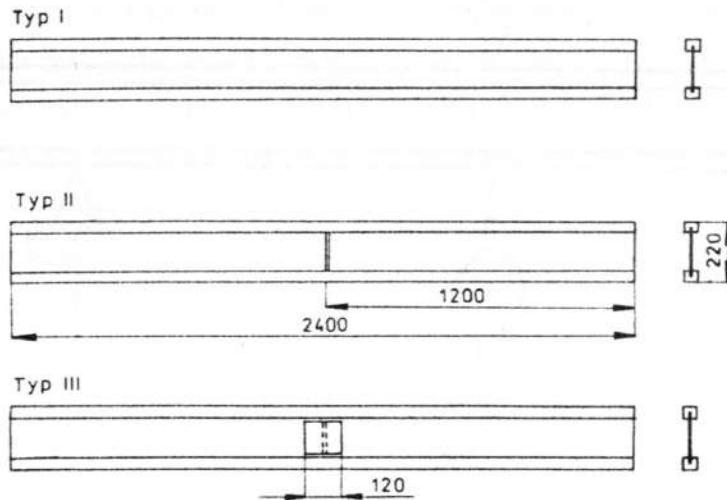
Celem badań było określenie wpływu powyższych czynników na właściwości mechaniczne belki dwuteowej. Badania te polegały na doświadczalnym wyznaczeniu sztywności i wytrzymałości doraźnej belki.

Zgodnie z założeniami przyjęto trzy warianty konstrukcyjne belek:

- belka typu I - ze środkiem ciągłym,
- belka typu II - ze środkiem dzielonym,
- belka typu III - ze środkiem dzielonym i miejscem podziału wzmocnionym nakładkami.

Belkę typu I, o środku ciągłym, potraktowano jako przypadek porównawczy dla belek typu II i III o środku dzielonym. Poszczególne warianty belek przedstawiono na rys. 2. W belkach typu II i III odcinki środka są dosunięte do siebie na styk. W belce typu III miejsce podziału środka wzmocniono dwoma symetrycznymi nakładkami wykonanymi z tej samej sklejki co środek. Kształt

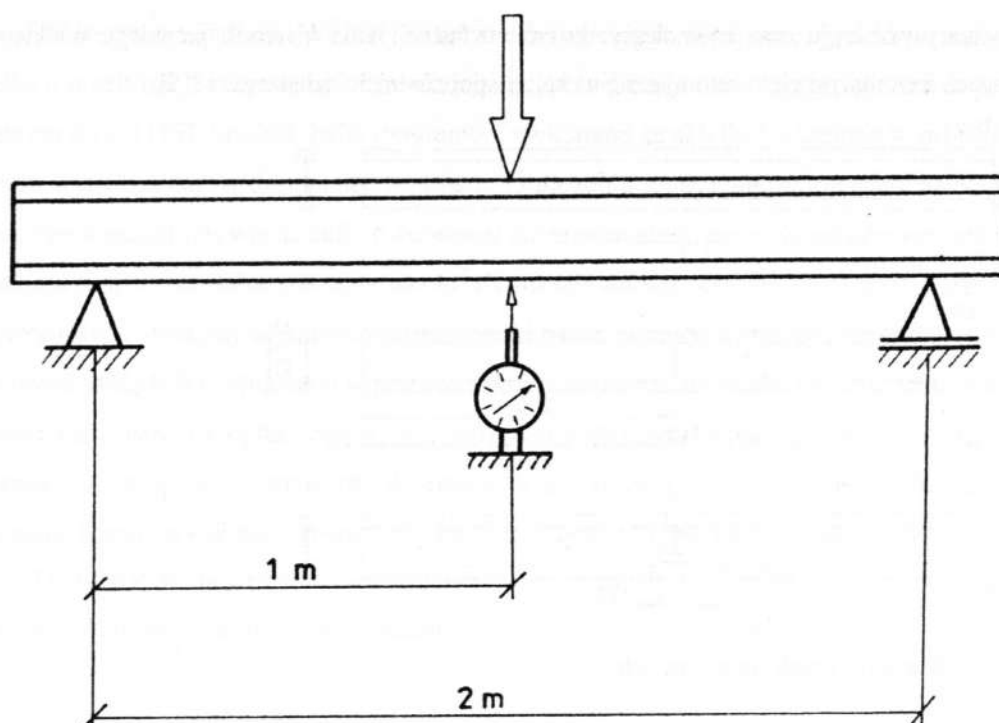
i wymiary przekroju oraz równoległy do osi wzdłużnej belki kierunek przebiegu włókien w obłogach środka przyjęto wzorując się na belce z poprzednich badań (rys. 1) [5].



Rys. 2. Warianty belek dwuteowych

3. Metodyka badań

Do badań przygotowano sześć belek z dzielonym środkiem. W trzech z nich miejsce podziału środka wzmocniono przez doklejenie nakładek ze sklejki o wymiarach pokazanych na rys. 2. Zrezygnowano z wykonywania belek ze środkiem niezdelonym. Belki te były bowiem przedmiotem poprzednich badań [5]. Pasy wszystkich typów belek wykonano z drewna sosnowego klasy KS, środek zaś ze sklejki liściastej wodoodpornej, siedmiowarstwowej o grubości 8mm. Środek z pasami oraz nakładkami sklejano żywicą fenolowo-formaldehydową AG [4].



Rys. 3. Schemat obciążenia belki i pomiaru jej ugięcia

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym z nich określano sztywność belki poprzez pomiar jej strzałki ugięcia. W drugim zaś - wytrzymałość doraźną belki. W obu etapach wykorzystano te same próbki, stosując metodykę poprzednich badań autorów [5]. Schemat obciążania belki i pomiaru jej ugięcia przedstawiono na rys. 3. Nacisk wywierano przy pomocy maszyny wytrzymałościowej ZD 10/90 firmy Rauenstein. W maszynie tej zainstalowano specjalną stalową, bardzo sztywną belkę, służącą do zamocowania podpór. Zastosowano nacisk jednopunktowy w połowie długości belki. Podpory usytuowano symetrycznie względem napory przyjmując ich rozstaw równy 2m. Pod belką, w połowie jej długości, dokładnie pod miejscem przyłożenia siły obciążającej, umieszczano statyw z czujnikiem zegarowym służącym do pomiaru ugięcia. Dokładność wskazań czujnika wynosiła 0.01mm. Jako maksymalną wartość siły przy badaniu sztywności belki przyjęto 5kN.

Pomiaru ugięć belki dokonywano przy kilku poziomach obciążenia, które narastało ze średnią prędkością około 10 kN/min. Po uzyskaniu obciążenia o wartości 1kN i utrzymaniu

go przez 10 sekund odczytywano ugięcie, po czym zwiększano stopniowo wartość obciążenia do poziomu 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. Obrócenie belki wokół jej osi pozwala na uzyskanie dodatkowych wyników. Ze względu bowiem na niejednorodność drewna zawartego w pasach belki, na zróżnicowane - głównie przez występowanie sęków - właściwości pasa górnego i dolnego, obrócona belka stanowi nieco inny materiałowo obiekt mechaniczny.

Po przeprowadzeniu prób obciążenie - odkształcenie w zakresie sprężystej pracy belek przystąpiono do prób niszczących, obciążając belki siłą o narastającej - aż do zniszczenia - 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.

Przed przystąpieniem do badań, belki sezonowano w laboratorium w temperaturze $20 \pm 1^\circ \text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $65 \pm 5\%$.

4. Wyniki badań i ich analiza

Szczegółowe wyniki badania sztywności belek przedstawiono w tabelach 1-5, uwzględniając pięć poziomów obciążenia: 1, 2, 3, 4 i 5 kN. W tabelach tych zamieszczono także średnie wartości ugięć oraz odchylenia standardowe i współczynniki zmienności dla poszczególnych typów belek.

Tabela 1. Ugięcia belek poszczególnych typów przy obciążeniu siłą $P=1\text{kN}$

Typ i numer belki		Wartość ugięcia w mm		Ugięcie średnie mm	Odchylenie standardowe mm	Współczynnik zmienności %
		*	**			
I	1	1.11	1.01	1.005	0.086	8.6
	2	1.02	1.08			
	3	0.92	0.89			
II	1	1.01	0.91	0.912	0.072	7.9
	2	0.90	0.91			
	3	0.79	0.95			
III	1	1.11	0.84	0.962	0.102	10.6
	2	0.97	0.85			
	3	0.99	1.01			

*) ustawienie 1 (0°); **) ustawienie 2 (180°)

Tabela 2. Ugięcia belek poszczególnych typów przy obciążeniu siłą $P=2\text{kN}$

Typ i numer belki		Wartość ugięcia w mm		Ugięcie średnie mm	Odchylenie standardowe mm	Współczynnik zmienności %
		*	**			
I	1	1.90	1.81	1.810	0.072	4.0
	2	1.86	1.84			
	3	1.73	1.72			
II	1	1.87	1.76	1.743	0.088	5.0
	2	1.71	1.76			
	3	1.60	1.76			
III	1	1.94	1.65	1.760	0.107	6.1
	2	1.77	1.65			
	3	1.76	1.79			

*) ustawienie 1 (0°); **) ustawienie 2 (180°)

Tabela 3. Ugięcia belek poszczególnych typów przy obciążeniu siłą P=3kN

Typ i numer belki		Wartość ugięcia w mm		Ugięcie średnie mm	Odchylenie standardowe mm	Współczynnik zmienności %
		*	**			
I	1	2.68	2.56	2.615	0.084	3.2
	2	2.64	2.73			
	3	2.53	2.53			
II	1	2.70	2.59	2.528	0.115	4.5
	2	2.50	2.52			
	3	2.35	2.5			
III	1	2.69	2.42	2.533	0.104	4.1
	2	2.55	2.42			
	3	2.59	2.53			

*) ustawienie 1 (0°); **) ustawienie 2 (180°)

Tabela 4. Ugięcia belek poszczególnych typów przy obciążeniu siłą P=4kN

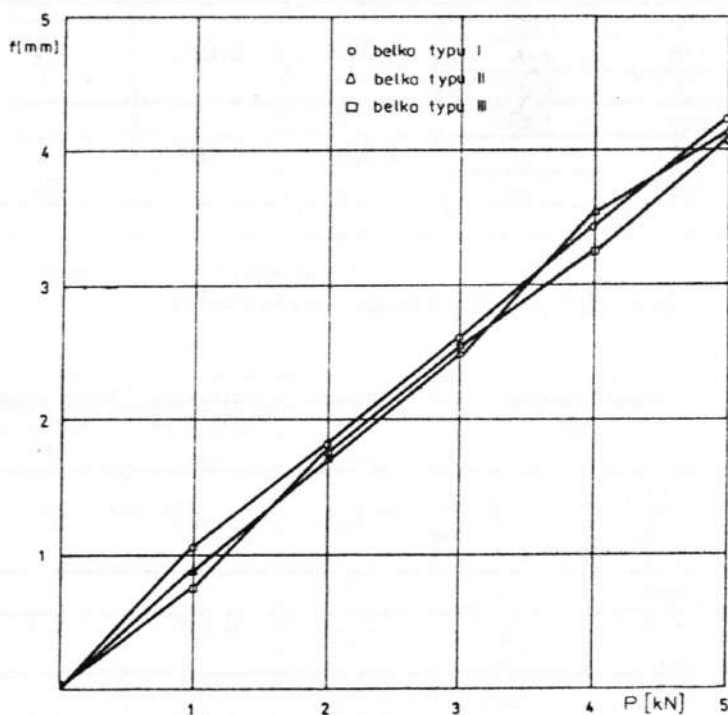
Typ i numer belki		Wartość ugięcia w mm		Ugięcie średnie mm	Odchylenie standardowe mm	Współczynnik zmienności %
		*	**			
I	1	3.49	3.47	3.435	0.091	2.7
	2	3.45	3.55			
	3	3.33	3.32			
II	1	3.56	3.46	3.355	0.143	4.3
	2	3.32	3.34			
	3	3.14	3.31			
III	1	3.46	3.23	3.323	0.112	3.4
	2	3.47	3.24			
	3	3.25	3.29			

Tabela 5. Ugięcia belek poszczególnych typów przy obciążeniu siłą P=5kN

Typ i numer belki		Wartość ugięcia w mm		Ugięcie średnie mm	Odchylenie standardowe mm	Współczynnik zmienności %
		*	**			
I	1	4.36	4.20	4.262	0.148	3.5
	2	4.36	4.44			
	3	4.16	4.05			
II	1	4.40	4.30	4.165	0.165	4.1
	2	4.12	4.15			
	3	3.93	4.09			
III	1	4.23	4.32	4.145	0.109	2.6
	2	4.12	4.11			
	3	4.05	4.04			

*) ustawienie 1 (0°); **) ustawienie 2 (180°)

Na rys. 4. przedstawiono uśrednione wykresy strzałki ugięcia f badanych typów belek w funkcji obciążenia P . Wykresy te są zbliżone do prostoliniowych, z czego można wnioskować o liniowo-sprężystej pracy tych belek w pełnym zakresie przewidzianych dla nich obciążeń. Jednocześnie widoczna jest dość duża zbieżność wykresów dla poszczególnych typów belek wynikająca z niewielkiego zróżnicowania ich ugięć przy danym poziomie obciążenia.



Rys. 4. Uśrednione wykresy ugięć poszczególnych wariantów belek dwuteowych

Postanowiono zatem porównać średnie ugięcia badanych belek, przyjmując jako punkt odniesienia belkę typu I o średniku ciągłym. Odpowiednie względne różnice średnich ugięć zestawiono w tabeli 6. Charakterystyczny jest ujemny znak każdej z tych różnic. Wynika to z faktu, że średnie ugięcia belek ze średnikami dzielonym są każdorazowo, dla poszczególnych poziomów obciążenia, mniejsze niż średnie ugięcia belek o średniku niedzielonym. Poza przypadkiem porównania ugięć belek typu I i II przy obciążeniu belki siłą 1kN, względne różnice ugięć nie przekraczają 4.3%. W związku z tak małymi wartościami tych różnic postanowiono sprawdzić, czy są one istotne statystycznie. W tym celu zastosowano test istotności różnic Studenta.

Tabela 6. Porównanie średnich ugięć belek typu II i III ze średnikiem dzielonym ze średnimi ugięciami belek typu I o średniku niedzielonym

Wartość obciążenia w kN	Względna różnica średnich ugięć belek typu I i II	Względna różnica średnich ugięć belek typu I i III
1	-9.2	-4.3
2	-4.3	-2.7
3	-3.3	-3.1
4	-2.3	-3.3
5	-2.3	-2.7

Testowaniu poddano trzy poziomy obciążenia: 1, 3 i 5kN. Na podstawie wielkości statystycznych przedstawionych w tabelach 1. 3. i 5. obliczono wartości statystyki t i zestawiono je w tabeli 7. W pierwszej kolejności porównano średnie wartości ugięć belki o średniku ciągłym z ugięciami belki o średniku dzielonym. Następnie porównano ugięcia belki o średniku ciągłym z ugięciami belki o średniku dzielonym, wzmocnionym nakładkami.

Tabela 7. Zestawienie wartości statystyk t dla poszczególnych typów belek, z uwzględnieniem trzech poziomów obciążenia

Porównywane typy belek	Wartości obliczonej statystyki t przy danych poziomach obciążenia		
	1 kN	3 kN	5 kN
I-II	2.03	1.43	1.07
I-III	0.79	1.50	1.56

Ponieważ porównywane średnie wartości ugięć belek wyznaczone były na podstawie 6 powtórzeń, więc przy $6+6-2=10$ stopniach swobody i założonym poziomie istotności $\alpha=0.05$ wartość krytyczna t_{α} statystyki t wynosi $t_{\alpha}=2.23$. Porównując tę wartość z danymi zawartymi w tabeli 7. zauważamy, że dla każdego przypadku zachodzi relacja:

$$t < t_{\alpha}$$

wskazująca na nieistotność różnic ugięć porównywanych typów belek, co zaznaczono w tabeli 8.

Tabela 8. Ocena charakteru różnic średnich wartości ugięć poszczególnych typów belek dwuteowych

Porównywane typy belek	Charakter różnic ugięć belek dwuteowych przy danych poziomach obciążenia		
	1 kN	3 kN	5 kN
I-II	nieistotna	nieistotna	nieistotna
I-III	nieistotna	nieistotna	nieistotna

Można więc stwierdzić, że dla rozpatrywanych belek dwuteowych zarówno podzielenie środka, jak i wzmocnienie miejsca podziału nakładkami nie ma statystycznie istotnego wpływu na wartość ugięcia belki, a zatem i na jej sztywność zginania.

Wyniki badań niszczących przedstawiono w tabeli 9. Na podstawie wartości sił niszczących P_n belki obliczono niszczące momenty zginające M_n oraz wytrzymałość umowną R_u według następujących wzorów [5]:

$$M_n = \frac{P_n \cdot l}{4} \quad (1)$$

$$R_u = \frac{M_n}{W_z} \quad (2)$$

Tabela 9. Wyniki badań niszczących poszczególnych typów belek

Typ i numer belki		Wartość siły niszczącej P_n w kN	Opis niszczenia próbek
I	1	12.5	rozłupanie pasa górnego, ścięcie spoiny
	2	11.6	ścięcie spoiny, rozłupanie pasa dolnego
	3	13.3	rozłupanie pasa dolnego, zwichrzenie
II	1	15.1	ścięcie spoiny, zwichrzenie
	2	12.8	pęknięcie pasa górnego pod naporą
	3	11.8	ścięcie spoiny, zwichrzenie
III	1	13.6	rozłupanie pasa górnego
	2	13.0	zwichrzenie, rozłupanie pasa dolnego
	3	13.5	jak wyżej

gdzie: l - odległość między podporami,

W_z - wskaźnik wytrzymałościowy przekroju dwuteowego na zginanie, równy:

$$W_z = \frac{2I_z}{h} \quad (3)$$

gdzie: I_z - zastępczy moment bezwładności przekroju,

h - wysokość belki

przy czym

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

gdzie:

I_f , I_w - odpowiednio momenty bezwładności pasów i środka względem osi obojętnej belki,

E_m^{skl} - moduł sprężystości sklejk przy zginaniu w płaszczyźnie płyty [6],

E_m^{dr} - moduł sprężystości drewna wzdłuż włókien [6].

Rozpatrywane belki wykonano z następujących materiałów: drewno sosnowe klasy KS, sklejka liściasta wodoodporna. Dla tych materiałów, zgodnie z PN-81/B-03150.01 [6], występujące we wzorze (4) moduły sprężystości wynoszą $E_m^{dr}=9000$ MPa oraz $E_m^{skl}=5000$ MPa. Poszczególne wartości wytrzymałości umownych oraz podstawowe wielkości statystyczne przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Wyniki analizy wartości sił niszczących dla belek dwuteowych

Typ belki	Średnia siła niszcząca w kN	Odchylenie standardowe w kN	Współczynnik zmienności w %	Średnia wytrzymałość umowna w MPa
I	12.47	0.85	6.8	23.4
II	13.23	1.69	12.8	24.8
III	13.37	0.32	2.4	25.1

Podobnie jak w przypadku badania sztywności, także dla badań niszczących obliczono względne różnice średnich sił niszczących między belkami typu I a belkami typu II i III (tabela 11).

Tabela 11. Zestawienie różnic względnych w wartościach sił niszczących dla belek poszczególnych typów

Względna różnica średnich sił niszczących dla belek typu I i II	Względna różnica średnich sił niszczących dla belek typu I i III
6.1 %	7.2 %

Kolejnym etapem obliczeń było poddanie wyników prób niszczących testowi istotności różnic Studenta. Wartości sił niszczących mierzone były dla trzech próbek z każdego typu. Liczba stopni swobody wynosiła zatem $3+3-2=4$. Przy czterech stopniach swobody i przy poziomie istotności $\alpha=0.05$ wartość krytyczna t_{α} , odczytana z tablic, wynosiła $t_{\alpha}=2.78$. Porównując tę wartość z danymi zawartymi w tabeli 12. stwierdzamy, że dla obu przypadków zachodzi relacja:

$$t < t_{\alpha}$$

Tabela 12. Charakter różnic średnich sił niszczących poszczególnych typów belek dwuteowych

Porównywane typy belek	Wartość statystyki t	Charakter różnic
I-II	0.70	nieistotna
I-III	1.72	nieistotna

Zatem różnice wytrzymałości porównywanych typów belek są statystycznie nieistotne, podział środka i ewentualne wzmocnienie miejsca tego podziału nakładkami nie wpływają na wytrzymałość na zginanie rozpatrywanych belek dwuteowych.

5. Podsumowanie

Badane belki o przekroju dwuteowym poddane próbie zginania w zakresie sprężystym charakteryzowały się znaczną liniowością przyrostu strzałki ugięcia w funkcji działającej siły. Wobec stwierdzonych niewielkich rozrzutów pomierzonych ugięć dla poszczególnych belek, możliwe było przeanalizowanie istotności różnic sztywności dla serii różniących się konstrukcją środka. Wyniki przeprowadzonego statystycznego testu Studenta dowodzą, że sztyw-

ność zginanej belki o przekroju dwuteowym nie zależy w sposób istotny od konstrukcji środka. W szczególności podział środka pośrodku jego długości oraz ewentualne wzmocnienie miejsca podziału przez doklejenie nakładek nie powoduje zmiany sztywności belki.

Przeprowadzone następnie próby niszczące również charakteryzowały się niewielkim rozrzutem wartości siły niszczącej, czego dowodem są niewielkie wartości współczynnika zmienności. Dokonana następnie analiza przy wykorzystaniu testu Studenta dowiodła, że różnice w wytrzymałości doraźnej belek dwuteowych różniących się konstrukcją środka nie są istotne statystycznie.

Przedstawione wyniki dotyczą badań w swoim założeniu ograniczonych, uwzględniających jeden typ obciążenia - sposób podparcia i przyłożenia siły - oraz dwie podstawowe wielkości charakteryzujące belkę tzn. sztywność i wytrzymałość doraźną. Zrozumiałe jest, że pełna charakterystyka wytrzymałościowa belek o przekroju dwuteowym będzie możliwa do określenia po przeprowadzeniu dalszych badań, uwzględniających inne sposoby obciążenia oraz inne rozwiązania konstrukcyjne części składowych tych belek.

LITERATURA

- [1] Czechowicz J., Konstrukcje drewniane klejone, Arkady. Warszawa 1960
- [2] Dziarnowski Z., Michniewicz W., Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych, Arkady. Warszawa 1974
- [3] Dziarnowski Z., Mielczarek Z., Zastosowanie drewna i materiałów drewnopochodnych w budownictwie polskim i zagranicą. Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej 1983, nr 234, s. 11-16
- [4] Prawdzinska L., Zygmund H., Kleje. Informator. Biuro Wydawnicze "Chemia". Warszawa 1979
- [5] Wilczyński A., Gogolin M., Kwieciński P., Badania belek dwuteowych sklejonych z drewna i sklejki. Zeszyty Naukowe WSP w Bydgoszczy, Studia Techniczne z.18, 1995, s. 94-117
- [6] PN-81/B-03150. Konstrukcje z drewna i materiałów drewnopochodnych. Obliczenia statyczne i projektowanie

**EFFECT OF THE WAY OF WEB DIVIDING AND JOINING ON STIFFNESS
AND ULTIMATE STRENGTH OF WOOD COMPOSITE I - BEAMS
WITH PLYWOOD WEB**

Summary

In this paper the investigations on composite I - beams with solid wood flanges and plywood web were presented. Three types of web designs were tested: continuous web, butt joint and strapped joint web. It was found that the design of the web did not influence significantly on the stiffness and ultimate load capacity of the tested I - beams.