

Perspektywy rozwoju rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych belek zespolonych w świetle najnowszych badań

Prospects for the development of material and structural solutions for composite beams in the light of the latest research

dr inż. Jacek Nawrot (ORCID: 0000-0002-9581-1388), Politechnika Częstochowska

DOI 10.5604/01.3001.0053.8503

Streszczenie: Ciągły rozwój konstrukcji budowlanych powoduje doskonalenie istniejących oraz powstawanie nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych, w tym również dotyczących belek zespolonych. W pracy dokonano przeglądu najnowszych badań w tym zakresie. Na ich podstawie wskazano, że największy potencjał rozwoju mają rozwiązania, których parametry wytrzymałościowe i użytkowe są porównywalne z tradycyjnymi konstrukcjami, bazujące na materiałach ekologicznych lub cechujących się niższą energochłonnością i emisyjnością niż stal czy beton, do produkcji których można wykorzystać odpady i surowce pochodzące z recyklingu.

Słowa kluczowe: belki zespolone, stropy zespolone, dźwigary kompozytowe.

Abstract: The continuous development of building structures results in the improvement of existing and the emergence of new material and structural solutions, including composite beams. The paper reviews the latest research in this field. On their basis, it was indicated that the greatest potential for development has solutions whose strength and performance parameters are comparable to traditional structures, based on ecological materials or characterized by lower energy consumption and emissivity than steel or concrete, for the production of which waste and recycled raw materials can be used.

Keywords: composite beams, composite floors, composite girders.

1. Wprowadzenie

Najczęściej stosowanym rodzajem belek zespolonych są zespolone dźwigary stalowo-betonowe. Składają się one z elementu stalowego (pełnościennego, kratowego lub ażurowego – pełnościennego z otworami w środku) zespolonego z płytą żelbetową. Zespolenie może być realizowane za pomocą specjalnych łączników (np. sworznie typu Nelson, X-HVB Hilti), śrub wysokiej wytrzymałości czy poprzez odpowiednie ukształtowanie środka kształownika stalowego (*composite dowels*) [1]. Coraz częściej podejmowane są jednak próby doskonalenia istniejących rozwiązań oraz tworzenia nowych, zarówno pod kątem konstrukcyjnym jak i materiałowym. W niniejszym artykule dokonano przeglądu najnowszych badań w tym zakresie oraz podjęto próbę określenia perspektyw i kierunków rozwoju rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych belek zespolonych.

2. Zespolone belki stalowo-betonowe

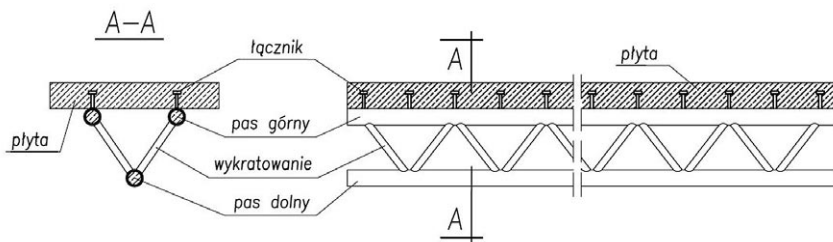
Pierwszym kierunkiem, w jakim prowadzone są prace badawcze, jest modyfikacja, rozwijanie i ulepszanie typowych

konstrukcji stalowo-betonowych. Są one najpowszechniej stosowane spośród wszystkich typów konstrukcji zespolonych. Wynika to z ich dużej nośności i sztywności, znajomości technologii ich wytwarzania, przejrzystych i powszechnie znanych norm projektowych oraz dostępności poszczególnych komponentów składowych (m.in. łączników, blach do stropów zespolonych itp.). Konstrukcje te podlegają ciągłym innowacjom, które powodują, że wprowadzone modyfikacje poprawiają parametry wytrzymałościowe lub użytkowe danego obiektu budowlanego.

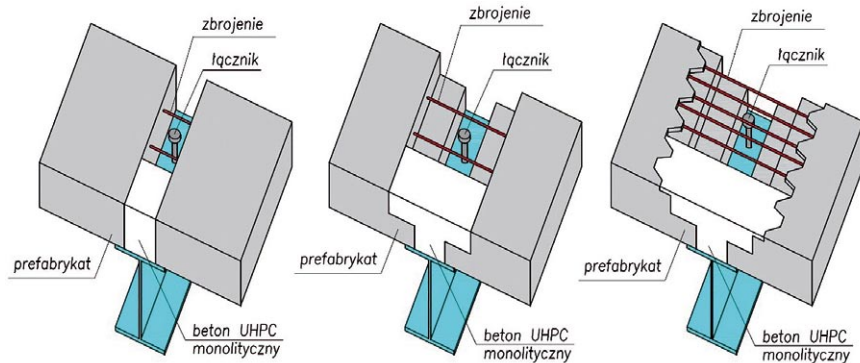
Przykładem tego może być propozycja zespolonych belek kratownicowo-betonowych (STTC – *Steel Tubular Truss-and-Concrete*) [2], w których pasy kratownicy stalowej wypełniono betonem (rys. 1). Dzięki temu zwiększono nośność oraz sztywność belki, a także ograniczono możliwość miejscowego wyoboczenia pasa. Belki tego typu zastosowano m.in. w mostach i wiaduktach w Szwajcarii (wiadukt Lully) oraz Chinach (most Ganhaizi) [3].

W belkach zespolonych komponent betonowy może stanowić prefabrykowaną płytę żelbetową (rys. 2).

Dzięki takiemu rozwiązaniu skraca się czas wykonywania stropu na budowie oraz szybciej (niż w przypadku konstrukcji



Rys. 1. Zespólna belka kratownicowo-betonowa



Rys. 2. Zespolecie prefabrykowanych płyt stropowych z wykorzystaniem betonu UHPC

monolitycznych) osiągana jest jego funkcjonalność, umożliwiającą wykonywanie dalszych prac. W przypadku belek zespolonych z prefabrykowanymi żelbetowymi płytami stropowymi, często czynnikiem decydującym o ich nośności jest jakość połączenia betonu monolitycznego (wypełniającego przestrzeń między sąsiednimi płytami a pasem górnym stalowego kształtownika) z prefabrykatami i łącznikami. W pracach [4, 5] autorzy przedstawili kilka wariantów geometrii tego połączenia (rys. 2), a jako beton monolityczny zastosowano beton wysokowartościowy (UHPC – Ultra-High-Performance Concrete). Wykazano, że nośność na ściskanie badanych belek była porównywalna lub większa niż analogicznej belki z płytą monolityczną.

Zauważalną tendencją jest również wykorzystywanie w konstrukcjach stalowo-betonowych materiałów pochodzących z recyklingu. W pracy [6] autorzy przedstawili belkę zespoloną z prefabrykowaną płytą stropową zawierającą kruszywo pochodzące z recyklingu (RAC – Recycled Aggregate Concrete), a w pracy [7] propozycję wykorzystania betonu z domieszką granulatu gumowego z opon samochodowych (CRC – Crumb Rubber Concrete).

3. Inne belki zespolone niż stalowo-betonowe

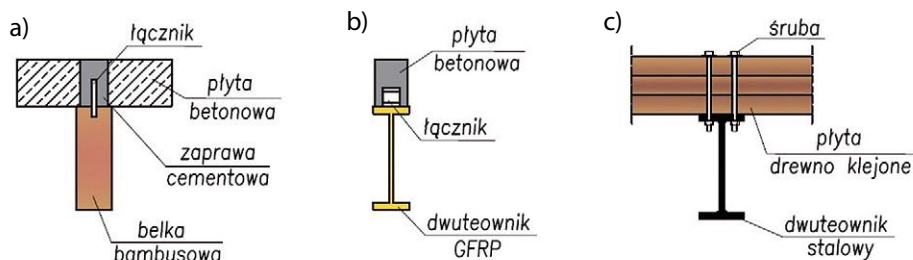
Drugi kierunek badań zmierza do opracowywania rozwiązań, w których beton lub stal zastępowane są innymi materiałami (rys. 3). Uzasadnieniem takiego postępowania mogą

być m.in. względy ekologiczne lub specyficzne warunki pracy konstrukcji, wymagające niestandardowych właściwości materiałowych.

Przykładem takiego rozwiązania jest propozycja zespolonych belek drewniano-betonowych (TCC – Timber-Concrete Composite), które łączą ze sobą zalety drewna: dobra wytrzymałość na rozciąganie, odporność na korozję, z zaletami betonu: dobra wytrzymałość na ściskanie, lepsze tłumienie drgań niż w przypadku stropów drewnianych [8]. Dalszym rozwinięciem tej koncepcji są zespolone belki bambusowo-betonowe (BBC – Bamboo-Concrete Composite). Zespolecie może być zrealizowane za pomocą łączników w postaci blachy perforowanej [9], prętów [10] lub łączników kołkowych [11]. W tym ostatnim przypadku belka bambusowa zespolona jest z płytą betonową

z lekkiego betonu za pomocą odcinków prętów zbrojeniowych średnicy 12 i 16 mm (rys. 3a). Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że nośność na zginanie oraz sztywność badanych belek zespolonych była odpowiednio: o 1,49 do 1,96 razy wyższa oraz o 2,18 do 3,47 razy wyższa niż belki bambusowych [11].

Kształtownik stalowy może być również zastąpiony profilem z polimeru kompozytowego FRP (Fiber Reinforced Polymer), w szczególności, w przypadku zastosowania włókien szklanych, z polimeru GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) [12], który charakteryzuje się lekkością, wysoką wytrzymałością (w tym również zmęczeniową) oraz odpornością na korozję



Rys. 3. Belki zespolone: a) bambus-beton, b) polimer-beton, c) drewno-beton

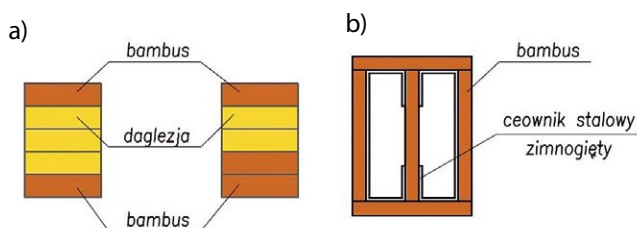
kwasową i zasadową. Zespolecie z płytą zrealizowano za pomocą łącznika w kształcie litery „U”, który wykonano z tego samego materiału co kształtownik – GFRP (rys. 3b), dzięki czemu całkowicie wyeliminowano stal z przekroju belki.

Zamiast płyty betonowej przekrój belki może stanowić płyta z drewna klejonego zespolona z kształtownikiem stalowym [13] (rys. 3c). Takie rozwiązanie stanowi alternatywę dla tradycyjnych stropów stalowo-betonowych, szczególnie w budynkach o lekkim szkieletie stalowym.

4. Belki kompozytowe

Trzeci kierunek badań skupia się na poszukiwaniu rozwiązań w obrębie konstrukcji samych dźwigarów (bez uwzględniania współpracy z płytą) a zespolenie następuje w obrębie przekroju poprzecznego belki, między materiałami, które ten przekrój tworzą.

Ciekawym rozwiązaniem w tym zakresie jest zastosowanie drewna bambusowego w dźwigarach bambusowo-drewnianych (BWCB – *Bamboo-Wood Composite Beam*) [14, 15] czy też bambusowo-stalowych [16, 17] (rys. 4). Bambus jest materiałem ekologicznym, ma dobre właściwości mechaniczne (wysoką wytrzymałość na rozciąganie), małą masę i ma krótszy okres wzrostu niż inne gatunki drzew.



Rys. 4. Kompozytowe belki zespolone: a) bambus-drewno, b) bambus-stal

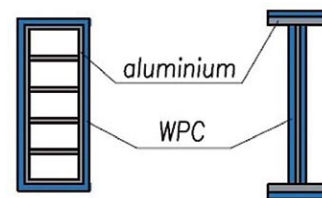
Przekrój belki bambusowo-drewnianej został ukształtowany w taki sposób, aby komponent o większej wytrzymałości (bambus) stanowił warstwy zewnętrzne, a lekkie drewno (daglezja) o mniejszej wytrzymałości – warstwy wewnętrzne (rys. 4a). Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na większą nośność i sztywność belek zespolonych drewniano-bambusowych niż belek z wykonanych w całości z drewna klejonego.

W belce bambusowo-stalowej kształtowniki zimnogięte połączone są z płytami bambusowymi za pomocą specjalnego kleju z żywicy epoksydowej. Przekrój belki może mieć kształt dwuteowy [16] lub skrzynkowy [17] (rys. 4b). Zastosowane rozwiązanie pozwala uzyskać belki o stosunkowo dużej nośności i sztywności, a dzięki płytom bambusowym, które usztywniają kształtowniki stalowe, maleje tendencja do lokalnej utraty stateczności ich ścianek.

Kolejnym przykładem metalowych elementów kompozytowych są belki aluminiowe z kompozytem plastikowo-drewnnym (A-WPC – *Aluminum-Wood-Plastic Composite*). WPC to kompozyt drewno-plastikowy (drewno/celuloza + tworzywo sztuczne), łączący fakturę drewna oraz powtarzalność tworzywa sztucznego (rys. 5). Do jego produkcji mogą być wykorzystane odpady drzewne oraz tworzywa pochodzące z recyklingu. Wadą tego materiału są jednak słabe parametry wytrzymałościowe. Sposobem na jej wyeliminowanie może być połączenie tego kompozytu z aluminium [18]. W pracy [19] przeprowadzono badania mające na celu określenie nośności na zginanie belek A-WPC składających się z pięciokomorowego aluminiowego przekroju

skrzynkowego, którego zewnętrzne ścianki zespolono z kompozytem WPC.

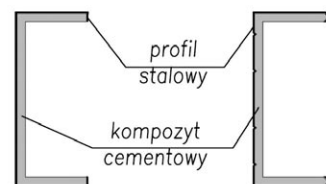
Rys. 5. Belki aluminiowe z kompozytem plastikowo-drewnnym A-WPC



WPC zastosowany w badanej belce wyprodukowany został przez firmę Anhui (Chiny), składał się w 30% z polietylenu, w 50% z mączki drzewnej, a 15% stanowił węgiel wapnia i inne składniki. Kompozyt ten został naniesiony „na gorąco” na profil aluminiowy o grubości ścianki 1,5 mm, grubość WPC wynosiła 2,5 mm. Określona doświadczalnie nośność na zginanie belek A-WPC była o ok. 9% wyższa niż w przypadku analogicznych belek drewnianych.

Innym rozwiązaniem z tej grupy są zimnogięte kształtowniki stalowe wzmocnione kompozytem cementowym z włóknami polietylenowymi (CFS/PE-ECC – *Cold-Formed Steel/Polyethylene-Engineered Cementitious Composites*) (rys. 6).

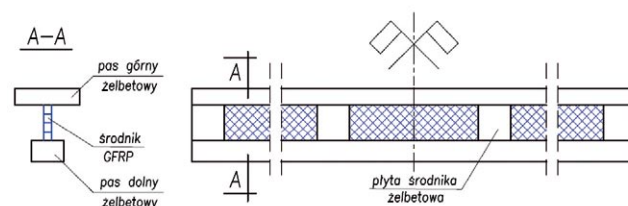
Rys. 6. Zimnogięte kształtowniki stalowe wzmocnione kompozytem cementowym



Autorzy pracy [20] wykonali belki na bazie ceowników zimnogiętych C300 o grubości ścianki 2,4 oraz 3 mm, które zespolono z kompozytem cementowym PE-ECC, przy czym grubość powłoki kompozytowej wynosiła 16 lub 26 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że nośność analizowanych elementów kompozytowych CFS/PE-ECC jest o 140% większa niż w przypadku analogicznych przekrojów stalowych bez kompozytu.

Kolejną grupę stanowią żelbetowe belki hybrydowe zawierające elementy kompozytowe [21]. Przykładem takiego rozwiązania może być zespolona belka betonowa ze środkiem wykonanym z siatki GFRP [22]. Badana belka miała kształt dwuteownika, którego pasy wykonano jako żelbetowe, środek wykonano z trzech paneli siatkowych GFRP o grubości 50 mm, o oczku kwadratowym 50x50 mm, oddzielonych od siebie żelbetowymi płytami środka (rys. 7).



Rys. 7. Zespolenie prefabrykowanych płyt stropowych z wykorzystaniem betonu UHPC

Całkowita wysokość przekroju była równa 452 mm, a długości poszczególnych belek wynosiły 1600, 2300 oraz 4000 mm. Nośność na zginanie oraz sztywność badanych belek była porównywalna z nośnością i sztywnością analogicznych elementów żelbetowych, przy mniejszej o ok. 20% masie własnej.

5. Podsumowanie

Rozwój rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych tradycyjnych belek zespolonych stalowo-betonowych przebiega w dwóch kierunkach. Pierwszy zmierza do wprowadzania modyfikacji, dzięki którym polepszeniu ulegają parametry wytrzymałościowe (nośność, sztywność) oraz użytkowe (np. większa odporność ogniowa). Jednak potencjał powstawania nowych rozwiązań w tym zakresie, które będą możliwe do zastosowania w praktyce wydaje się być ograniczony (ze względów ekonomicznych, możliwości wykonawczych w warunkach budowy, itp.).

Drugi kierunek dotyczy wykorzystywania materiałów z recyklingu, np. jako uzupełnienie składu betonu (RAC, CRC, itp.), które co najmniej nie pogarszają właściwości wytrzymałościowych elementu. Z uwagi na coraz większy nacisk na tego typu działania, który znajduje swoje odzwierciedlenie we wprowadzanych regulacjach i przepisach (szczególnie w państwach członkowskich Unii Europejskiej) ten kierunek ma dużo większy potencjał rozwoju.

Nowe rozwiązania belek zespolonych (uwzględniające współpracę z płytą), w których beton lub stal zostały zastąpione innymi materiałami będą również dość intensywnie rozwijane. Związane jest to z tendencją do ograniczania lub eliminowania niekorzystnego wpływu działalności człowieka na środowisko naturalne (budownictwo zrównoważone). Wytwarzanie elementów betonowych i stalowych związane jest z wysoką energochłonnością oraz wysokim poziomem emisji CO₂. W związku z tym (tam gdzie jest to możliwe) preferowane są rozwiązania bazujące na materiałach ekologicznych (np. drewno klejone zamiast betonu), o niższej energochłonności i emisyjności lub do produkcji których można wykorzystać odpady czy surowce pochodzące z recyklingu (np. GFRP). Ponieważ aktualnie opracowywane „zamienniki” mają dość ograniczone zastosowanie, dalsze działania będą zmierzały do powstawania elementów o lepszych parametrach wytrzymałościowych i użytkowych oraz atrakcyjnych pod względem cenowym, które będą stanowiły szerszą alternatywę dla stali i betonu.

Z analogicznych przyczyn, w podobnym stopniu, rozwijane będą również nowe koncepcje dźwigarów kompozytowych, jako opcja dla tradycyjnych belek stalowych lub betonowych. Przy czym w tej grupie elementów może pojawić się konieczność opracowania nowych sposobów łączenia tych dźwigarów z pozostałymi elementami konstrukcji, które wykonane będą z innych materiałów.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lacki P., Derlatka A., Kasza P., Gao S., Numerical study of steel-concrete composite beam with composite dowels connectors, *Computers and Structures* 255(2021), 106618
- [2] Hu B., Che R., Wang J., He X., Kundu T., Analytical investigation into the flexural behavior of steel tubular truss-and-concrete (STTC) composite beams, *Structures* 50(2023), str. 670–688
- [3] Huang W., Lai Z., Chen B., Yao P., Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders, *Engineering Structures* tom 152, 2017, str. 607–618
- [4] Wang H., Liu X., Yue Q., Wang N., Zheng M., Longitudinal shear behavior and design method of UHPC connection for prefabricated slabs in composite beams, *Engineering Structures* 277(2023), 115386
- [5] Shi F., Sun Ch., Liu X., Wang H., Zong L., Flexural behavior of prefabricated composite beam with cast-in-situ UHPC, *Structures* 45(2022), str. 670-684
- [6] Lu L., Gao M., Guo Y., Wang W., Yan H., Jiang T., Experiments on flexural behavior of the prefabricated RAC and NWC composite slab, *Ain Shams Engineering Journal* 13(2022), 101789
- [7] Yi O., Mills J.E., Zhuge Y., Ma X., Gravina R.J.: Youssif O., Performance of crumb rubber concrete composite-deck slabs in 4-point-bending, *Journal of Building Engineering*, tom 40, 2021, 102695
- [8] Simret T., Deresa, Xu J.J., Demartino C., Minaf o G., Camarda G., Static performances of timber- and bamboo-concrete composite beams: a critical review of experimental results, *Open Construction and Building Technology Journal* 15(2021), str. 17–54
- [9] Wei Y., Wang Z.Y., Chen S., Zhao K., Zheng K.Q., Structural behavior of prefabricated bamboo-lightweight concrete composite beams with perforated steel plate connectors, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 21(1)2021, str. 239–259
- [10] Wei Y., Chen S., Jiang J.F., Zhou M.Q., Zhao K., Experimental investigation of bamboo-concrete composite beams with threaded reinforcement connections, *Journal of Sandwich Structures and Materials* 24(1)2022, str. 601–626
- [11] Wang Z., Wei Y., Hu Y.F., Chen Y., Zhao K., An investigation of the flexural performance of bamboo-concrete composite beams with precast light concrete slabs and dowel connectors, *Journal of Building Engineering* 41(2021), 102759
- [12] Ge W., Zhang Z., Guan Z., Ashour A., Ge Y., Chen Y., Jiang H., Sun Ch., Yao S., Yan W., Cao D., Numerical study on flexural and bond-slip behaviours of GFRP profiled-concrete composite beams with groove shear connector, *Engineering Structures* 275(2023), 115226
- [13] Chiniforush A. A., Valipour H. R., Bradford M. A., Akbar Nezhad A., Experimental and theoretical investigation of long-term performance of steel-timber composite beams, *Engineering Structures* 249(2021), 113314
- [14] Zhang Z., Qiu Z., Experimental study on bending properties of bamboo-wood composite beams with different tectonic patterns, *Polymer Testing* 118(2023), 107907
- [15] Chen S., Wei Y., Ding M., Zhao K., Zheng K., Combinatorial design and flexural behavior of laminated bamboo-timber composite beams, *Thin-Walled Structures* 181(2022), 109993
- [16] Duan Y., Zhang J., Tong K., Wu P., Li Y., The effect of interfacial slip on the flexural behavior of steel-bamboo composite beams, *Structures* 32(2021), str. 2060–2072
- [17] Ding J., Wang X., Ge Y., Zhang J., Shan Q., Xu S., Wang J., Li Y., Experimental and nonlinear analytical investigation of the flexural performance of single-box double-chamber steel-bamboo composite beams, *Thin-Walled Structures* 183(2023), 110424
- [18] Zhao L., Xi f., Wang X., Mechanical performance of aluminum reinforced wood plastic composites under axial tension: an experimental and numerical investigation, *Journal of Wood Science* volume 67(2021), str. 1–8
- [19] Zhao L., Xi F., Flexural performance of reinforced aluminum-wood-plastic composite beam: An experimental and numerical investigation, *Thin-Walled Structures* 180(2022), 109910
- [20] Sheta A., Ma X., Zhuge Y., ElGawady M., Mills J., Abd-Elaal E., Flexural strength of innovative thin-walled composite cold-formed steel/PE-ECC beams, *Engineering Structures* 267(2022), 114675
- [21] Zhang P., Lv X., Liu Y., Zou X., Li Y., Wang J., Sheikh S.A., Novel fiber reinforced polymers (FRP)-ultrahigh performance concrete (UHPC) hybrid beams with improved shear performance, *Construction and Building Materials* 286(2021), 122720
- [22] Zou Y., Yu K., Heng J., Zhang Z., Peng H., Wu Ch., Wang X., Feasibility study of new GFRP grid web - Concrete composite beam, *Composite Structures* 305(2023), 116527