

dr inż. Kamil Słowiński*

dr hab. inż. Walter Wuwer, prof. nzw. WST*

Nowoczesna technologia zwiększania nośności stalowych prętów ściskanych

Modern technology of enhancement of the carrying capacity of steel bars under compression

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania elementów złożonych bliskogałęziowych, z podatnymi połączeniami gałęzi, w celu zwiększania nośności wyoboczeniowej ściskanych osiowo elementów prętowych w konstrukcjach obiektów nowo projektowanych oraz istniejących. Potwierdzono doświadczalnie dużą skuteczność zastosowanego sposobu wzmacniania elementów prętowych o przekrojach zamkniętych, na drodze łączenia ich z dwiema krótszymi gałęziami wspomagającymi z kształtowników giętych na zimno z blach (zob. również [6]) o przekrojach otwartych, przy użyciu – dostępnych na rynku krajowym – nowoczesnych łączników jednostronnych typu BOM-R16-4. W artykule podkreślono również korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania proponowanego sposobu kształtowania elementów złożonych.

Słowa kluczowe: pręty złożone, wzmacnianie, wyoboczenie, podatność, połączenia zakładkowe.

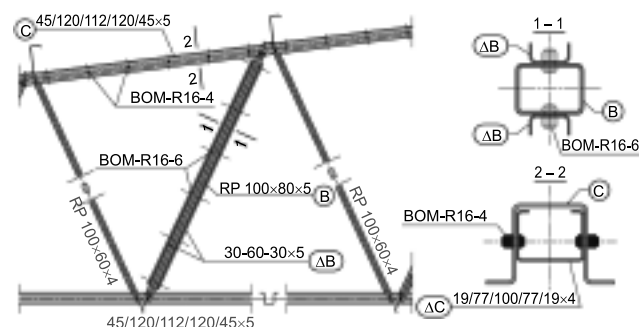
Abstract. The paper presents the possibility of applying closely spaced built-up elements with flexible connections of the branches, to enhance the buckling resistance of bar elements loaded in axial compression, in structures of newly designed and existing buildings. Experimental results confirmed high efficiency of the applied method for strengthening bar elements about closed sections by joining them with two shorter supporting branches made of cold-formed sections about open cross sections, using – available on the domestic market – modern blind bolts BOM-R16-4. Moreover, the economic benefits associated with the usage of the proposed method of forming built-up elements were emphasized in the article.

Keywords: built-up bars, strengthening, buckling, flexibility, lap joints.

Zagadnienia racjonalnego kształtowania obiektów budowlanych zostały współcześnie ujęte w postulaty budownictwa zrównoważonego [1]. Szczególnym przejawem dążeń do realizacji tych postulatów jest obserwowany obecnie dynamiczny rozwój lekkich i ekonomicznych konstrukcji nośnych budynków mieszkalnych, użyteczności publicznej i również przemysłowych [2, 3, 4, 5], wykonanych ze stalowych kształtowników profilowanych na zimno z blach [6]. W ten obszar działań wpisuje się – realizowany od kilku lat w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej – program badawczy, którego celem jest opracowanie innowacyjnego systemu konstrukcyjnego lekkich i ekonomicznych hal stalowych [7, 8, 9], wykorzystującego bogaty asortyment kształtowników giętych na zimno o przekrojach otwartych i zamkniętych, produkowanych przez huty krajowe. Cechami wyróżniającymi opracowywany system konstrukcyjny są: niewielkie zużycie materiału; ograniczenie do niezbędnego minimum prac warsztatowych oraz łatwy i szybki montaż konstrukcji na placu budowy z pojedynczych elementów prętowych, wykonywany przy użyciu nowoczesnych łączników mechanicznych typu BOM [10, 11] – dostępnych na rynku krajowym, które gwarantują spełnienie podstawowych wymagań stawianych połączeniom tak, aby nie były one najsłabszym ogniwem w modelu niezawodnościowym konstrukcji.

Ważnym elementem technologii opisywanego systemu konstrukcyjnego są pręty złożone bliskogałęziowe [12], z po-

datnymi zakładkowymi połączeniami ścianek gałęzi. Zastosowanie tego typu elementów złożonych nabiera szczególnego znaczenia w aspekcie racjonalnego kształtowania lekkich i ekonomicznych ustrojów prętowych, gdzie potrzeba poprawienia warunków stateczności wybranego elementu konstrukcji, np. ściskanego osiowo pasa górnego lub krzyżulca kratownicy (rysunek), nie powinna wymuszać istotnych zmian konstrukcyjnych w skali obiektu.



Kształtowanie prętów złożonych bliskogałęziowych w kratownicy w celu zwiększenia nośności ściskanych osiowo: krzyżulca i pasa górnego

Kształtowanie elementów bliskogałęziowych

Łączenie ściskanego osiowo wzmacnianego-głównego pręta „B” lub „C” (rysunek) na długości między węzłami podporowymi, z dodatkowymi, krótszymi od niego gałęziami wspomagającymi, oznaczonymi odpowiednio ΔB i ΔC

* Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach; Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych

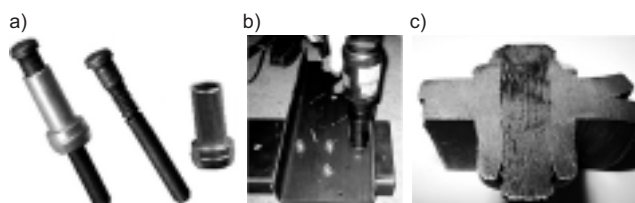
umożliwia swobodne kształtowanie elementu złożonego o wymaganych – z uwagi na poprawienie warunków stateczności – charakterystykach geometrycznych przekroju poprzecznego. Taki sposób kształtowania prętów złożonych jest szczególnie użyteczny przy wykonywaniu wzmocnień elementów prętowych w konstrukcjach istniejących. Nie zachodzi bowiem wtedy potrzeba doprowadzania gałęzi wspomagających do węzłów podporowych pręta głównego-wzmocnianego (rysunek) i wprowadzania kłopotliwych zmian konstrukcyjnych w tych węzłach.

Zastosowanie do wykonywania połączeń gałęzi innowacyjnego systemu łączników jednostronnych typu BOM umożliwia projektowanie elementów złożonych z kształtowników o ekonomicznych przekrojach otwartych i zamkniętych (rysunek). Sworznie BOM to łączniki dwukomponentowe, składające się z trzpienia oraz tulejki (fotografia 1a). Ich instalacja w otworach odbywa się za pomocą systemowego osadzaka (fotografia 1b) [10], i co ważne, nie wymaga wysokich kwalifikacji pracownika wykonującego scalanie ścianek.

Przeprowadzone badania doświadczalne połączeń 1-ciętych wykonanych za pomocą sworzni BOM wykazały, że w pewnych okolicznościach materiał tulejki sworzni szczelnie wypełnia otwory w łączonych ściankach (fotografia 1c) [7, 13]. Możliwe jest wówczas wykorzystanie w projektowaniu prętów złożonych bliskogałęziowych znacznych rezerw nośności, sztywności i ciągliwości zastosowanych połączeń zakładkowych, występujących przy wyęźnieniu tych złączy przy docisku [7]. Realizacja wzmocnienia wiąże się wtedy zarówno ze zwiększeniem promienia bezwładności przekroju wzmocnianego pręta, jak również jego sztywności osiowej na długości wzmocnienia. Transfer sił tnących w połączeniach powoduje bowiem włączenie się gałęzi wspomagających do współpracy z prętem głównym w przenoszeniu siły ściskającej [9].

Zakładkowe połączenia gałęzi – z uwagi na dociskowy charakter wyęźnienia – charakteryzuje jednak zauważalny stopień podatności translacyjnej [7, 8, 13, 14]. Podatność ta nie zapewnia pełnego, tj. wynikającego ze sztywności osiowej przekrojów prętów, udziału gałęzi wspomagających w przenoszeniu siły ściskającej. Rozdział sił wewnętrznych na współpracujące ze sobą gałęzie i nośność elementu złożonego w sposób istotny uzależnione są wówczas od charakterystyk sztywnościowych zastosowanych złączy zakładkowych [9].

Uwzględnienie w projektowaniu elementów złożonych bliskogałęziowych dociskowej fazy pracy złączy wiąże się jednak ze znacznymi korzyściami ekonomicznymi, które wynikają głównie z możliwości ograniczenia liczby łączników potrzebnych do scalenia ścianek współpracujących gałęzi,

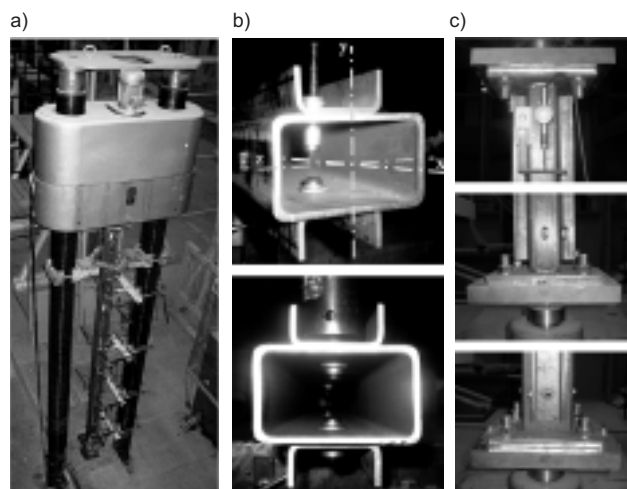


Fot. 1. Łącznik BOM-R16-6: a) widok łącznika, trzpienia i tulejki; b) scalanie ścianek kształtowników przy użyciu osadzaka hydraulicznego; c) przekrój w osi łącznika po osadzeniu w otworach [7]

a tym samym zmniejszenia zakresu prac związanych z obróbką gałęzi w warsztacie lub bezpośrednio na obiekcie. Nie do przecenienia jest również łatwy i szybki montaż konstrukcji na placu budowy.

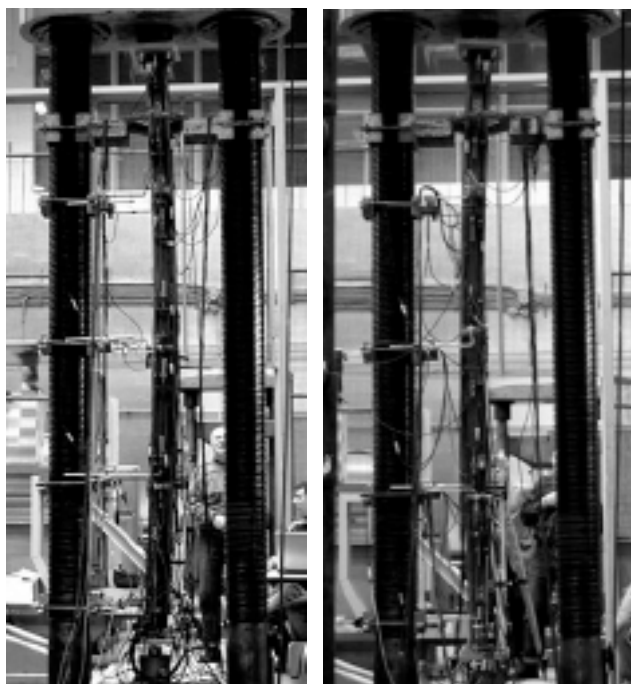
Rezultaty badań doświadczalnych

W laboratorium wykonano badanie pięciu elementów złożonych trójgałęziowych w skali naturalnej, które ściskano osiowo w maszynie wytrzymałościowej (fotografia 2a), aż do zniszczenia. Celem badań było ustalenie obliczeniowej nośności na wyboczenie obserwowanych prętów bliskogałęziowych. Gałąź pręta głównego długości 3000 mm, do której przykładane było obciążenie w węzłach podporowych, wykonano z kształtownika zamkniętego $100 \times 60 \times 4$, ze stali S355 (fotografia 2b). Dwie, odpowiednio krótsze, niedochodzące do węzłów podporowych, gałęzie wspomagające (fotografia 2c) – każda długości 2960 mm – zaprojektowano z kształtownika o przekroju otwartym U30/60/30 \times 4, także ze stali S355 (fotografia 2b). Współpraca każdej z dwu wzmocniających gałęzi ceowych z rurowym prętem głównym następowała za pośrednictwem ośmiu połączeń, wykonanych z zastosowaniem łączników BOM-R16-4 [10], rozmieszczonych co 408 mm na długości elementu złożonego [9]. Warto przy tym podkreślić, że ważnym kryterium doboru liczby i rozstawu połączeń gałęzi – wpisującym się w idee racjonalnego kształtowania konstrukcji – było ograniczenie do minimum nakładów pracy, czasu i kosztów.



Fot. 2. Elementy złożone trójgałęziowe: a) element próbny zabudowany na stanowisku badawczym; b) scalanie ścianek pręta głównego-rurowego i gałęzi wspomagających o przekroju otwartym; c) strefy podporowe w węzłach: górnym i dolnym

Stan graniczny nośności pięciu elementów próbnych – o schemacie statycznym pręta dwuprzegubowego i długości teoretycznej 3140 mm – osiągnięty został na skutek utraty stateczności ogólnej (fotografia 3), przy giętym wyboczeniu badanych prętów złożonych względem osi z, tj. w płaszczyźnie xy (fotografia 2b). Wyznaczona – na drodze oceny statystycznej wyników doświadczeń – obliczeniowa nośność na wyboczenie badanych prętów bliskogałęziowych była o ponad 70% większa od nośności wyboczeniowej samej tylko gałęzi rurowej [9]. Jednocześnie, z uwagi na podatne 1-cięte połączenia ścianek gałęzi, otrzymana nośność obliczeniowa elementów próbnych okazała się zauważalnie



Fot. 3. Typowe formy zniszczenia elementów próbnych przez wyboczenie względem osi z

mniejsza od nośności pręta o takim samym przekroju poprzecznym, w którym zapewniono pełną współpracę trzech gałęzi (co wymagałoby zastosowania większej liczby połączeń ścianek gałęzi).

Wykazano dużą skuteczność zastosowanego sposobu zwiększania nośności ściskanych osiowo elementów prętowych o przekrojach zamkniętych, na drodze łączenia ich z krótszymi gałęziami wspomagającymi o przekrojach otwartych, przy użyciu nowoczesnych łączników jednostronnych typu BOM [9]. Ponadto, otrzymane wyniki doświadczalne potwierdziły poprawność modelu teoretycznego, opisującego zachowanie się obserwowanych elementów trójgałęziowych [9].

Zakończenie

W projektowaniu elementów złożonych bliskogałęziowych ważnym aspektem jest świadome kształtowanie konstrukcji, przez umiejętne wykorzystanie charakterystyk sztywnościowych połączeń współpracujących gałęzi, aby z jednej strony uzyskać pożądaną efekt wzmocnienia, a z drugiej zminimalizować koszty inwestycji. Na uwagę zasługuje duża efektywność proponowanej metody zwiększania nośności wyboczeniowej prętów ściskanych osiowo, przy jednoczesnym zapewnieniu konstrukcji należytego poziomu niezawodności oraz odpowiedniej trwałości zgodnie z normą [15]. Efektywność ta wynika zarówno z wykazanej dużej skuteczności zastosowanego wzmocnienia, jak i niewielkich nakładów pracy, czasu i kosztów związanych z procesem scalania gałęzi elementów bliskogałęziowych.

Niewątpliwą zaletą opisanej technologii jest możliwość wzmocnienia prętów ściskanych o przekrojach zamkniętych kwadratowych i prostokątnych wykorzystywanych obecnie na szeroką skalę, m.in. w konstrukcjach wiązarów kratowych [16]. Możliwe jest również projektowanie elementów

o przekrojach zamkniętych, złożonych z kształtowników o przekrojach otwartych (przekrój 2-2 na rysunku).

Planowane są dalsze badania doświadczalne i teoretyczne elementów bliskogałęziowych. Ich wykorzystanie do wzmocnienia elementów prętowych w konstrukcjach istniejących wymaga bowiem stosownego uzupełnienia opracowanego modelu obliczeniowego tak, aby uwzględnił on stopień wyężenia oraz rodzaj i amplitudę imperfekcji, występujące we wzmocnianym elemencie. Ważne będą również badania prętów bliskogałęziowych poddanych obciążeniom o charakterze naprzemiennym i długotrwałym. Mając na uwadze cele aplikacyjne prowadzonych badań, m.in. możliwość zastosowania prętów bliskogałęziowych w konstrukcjach lekkich kratownic z mimośrodowymi połączeniami prętów w węzłach, bez blach węzłowych (rysunek), wskazane będzie badanie elementów jednocześnie ściskanych i obciążonych momentami zginającymi w węzłach.

Literatura

- [1] ECCS: Concepts and Methods for Steel Intensive Building Projects. publication, Brussels 2012.
- [2] North American Steel Framing Alliance: Low-Rise Residential Construction – Details. Washington 2000.
- [3] Schafer B. W.: Cold-formed steel structures around the world – A review of recent advances in applications, analysis and design. Steel Construction 4, No. 3, 2011, p. 141 – 149.
- [4] LaBoube R. A., Yu W. W.: Recent research and developments in cold-formed steel framing. Thin-Walled Structures, No. 32, 1998, p. 19 – 39.
- [5] Dubina D., Zaharia R., Ungureanu V.: Behaviour of built-up columns made of C sections connected with bolted C stitches. Proceeding of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Budapest 2002.
- [6] Moradi M., Arwade S. R., Schafer B. W.: Computational evaluation of limit states of thin-walled channels made from steel foam. Thin-Walled Structures, No. 62, 2013, p. 206-214.
- [7] Wuwer W.: Podatne połączenia na sworznie jednostronne w prętowych konstrukcjach cienkościennych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [8] Swierczyna S.: Nośność i sztywność jednoczętnych połączeń sworzniowych w konstrukcjach z kształtowników giętych. Rozprawa Doktorska. Gliwice 2011.
- [9] Słowiński K.: Badanie nośności ściskanych osiowo elementów bliskogałęziowych z podatnymi połączeniami. Rozprawa Doktorska. Gliwice 2013.
- [10] Boltimex: HUCKBOLT – technologia trwałych nieluzujących połączeń dowolnych konstrukcji. Boltimex – przedstawiciel HUCK, Katowice.
- [11] Instytut Techniki Budowlanej: Sworznie typu HUCK do wykonywania połączeń elementów konstrukcji metalowych. Aprobata Techniczna nr AT-15-3487/99.
- [12] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [13] Wuwer W., Swierczyna S., Słowiński K.: Nowoczesna technologia sworzniowych połączeń prętów z kształtowników giętych. Materiały Budowlane, nr 7, 2012, p. 32 – 34.
- [14] Wuwer W., Zamorowski J., Swierczyna S.: Lap joints stiffness according to Eurocode EC3 and experimental investigations results. Archives of Civil and Mechanical Engineering, No. 13, 2013, p. 7 – 13.
- [15] PN-EN 1990 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [16] Bródka J., Broniewicz M.: Kształtowniki o przekrojach zamkniętych – Poradnik dla projektantów i konstruktorów, cz. II. König Stahl, 2005.