

Marcin NIEDOŚPIAŁ¹

SZTYWNOŚĆ ŁĄCZNIKÓW SWORZNIOWYCH W ELEMENTACH ZESPOLONYCH STALOWO- BETONOWYCH – ZALECENIA NORMY A WYNIKI BADAŃ

W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie sztywności sworzni główkowych w stropach zespolonych o płycie pełnej i płycie na blachach fałdowych. Norma projektowania konstrukcji zespolonych (Eurokod 4) sugeruje przyjęcie sztywności łącznika o średnicy 19 mm równej 100 kN/mm nie różnicując tej wartości ze względu na długość sworznia, stosunek grubości płyty w fałdzie do grubości ponad fałdą, czy wytrzymałości betonu. Analizując dostępny asortyment blach trapezowych stosowanych w stropach zespolonych zauważyć można, że powyższa wartość ma zastosowanie do bardzo wąskiej grupy blach z dostępnego asortymentu. Okazuje się, że dla większości z dostępnych profili blach należy wyznaczyć ją doświadczalnie. Sztywność sworznia będzie miała wpływ na charakterystykę M-Ø węzła (a tym samym na wartości sił wewnętrznych w przypadku stosowania węzłów podatnych) oraz na naprężenia w zbrojeniu (a tym samym na szerokość rys). W artykule zawarto przegląd badań dostępnych w literaturze i zamieszczono wyniki sztywności sworzni wyznaczone z krzywej siła – poślizg. Wyniki te mogą stanowić wskazówki i pomoc dla projektantów w przypadku analizy konstrukcji zespolonych.

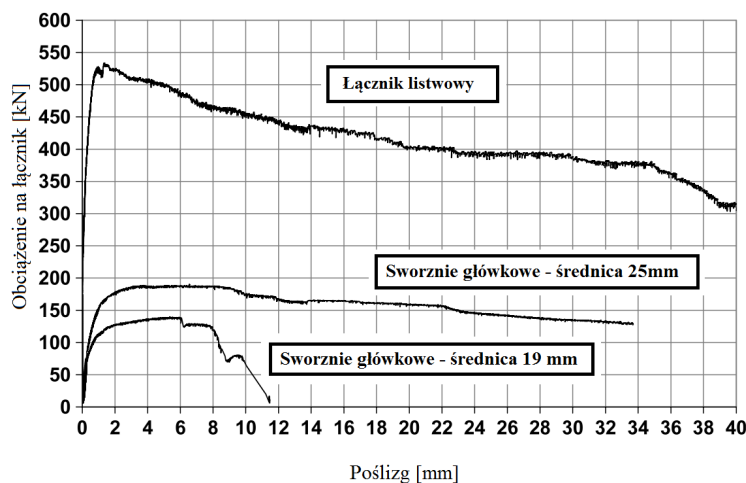
Słowa kluczowe: łączniki sworzniowe, sztywność sworznia, konstrukcja zespolona stalowo-betonowa, węzeł podatny, blacha profilowa, testy push-out

1. Wstęp

W przypadku zginanych elementów zespolonych stalowo betonowych w celu zapewnienia współpracy pomiędzy kształtownikiem stalowym, a płytą betonową należy zastosować odpowiednie łączniki. Na przestrzeni lat pojawiło się wiele typów łączników – jako jedne z pierwszych w pierwszej połowie XX wieku testowano łączniki spiralne [6]. Obecnie, w budownictwie kubaturowym, najpopularniejsze są główkowe łączniki sworzniowe.

¹ Marcin Niedośpiał, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Al. Armii Ludowej 16, 22 234 57 52, m.niedospial@il.pw.edu.pl

Poprzednio stosowane w Polsce normy w zakresie projektowania konstrukcji zespolonych [12], [13] oprócz główkowych łączników sworzniowych wyróżniały także: łączniki sworzniowe bez główek [12], łączniki blokowe [12], [13], łączniki kotwowe [12], [13], łączniki kątownikowe [13], śruby sprężające [13]. W literaturze można znaleźć także inne przykłady połączeń np.: ciągłe wykonane z połówki dwuteownika, śruby wkręcane, ciągłe z kształtownika giętego [5], czy w postaci łącznika kapeluszowego mocowanego do belki stalowej przez blachę fałdową stropu gwoździami wstrzeliwanymi [9], [10]. Innym przykładem są łączniki w postaci listew perforowanych (popularne w konstrukcjach mostowych) – charakteryzują się dużą nośnością zarówno w przypadku obciążeń stałych, jak i zmiennych. Przykładowe charakterystyki obciążenie – poślizg dla łączników sworzniowych o średnicy 19 mm i 25 mm oraz listwowego zaczerpnięte z pracy [20] pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Zależność obciążenie – poślizg dla wybranych rodzajów łączników, na podstawie [20]

Fig. 1. Load – slip relationship for selected types of connectors, based on [20]

Norma [15] opisuje szczegółowo sposób wymiarowania w przypadku, gdy jako zespolenie zastosowane zostały łączniki sworzniowe z łbami, definiowanymi przez normę [16]. W przypadku zastosowania innego typu łączników ich parametry należy określić poprzez wykonanie badań doświadczalnych. Według zaleceń [15] łączniki powinny przenieść siły ścinające bez uwzględniania naturalnej przyczepności pomiędzy belką stalową a płytą betonową i powinny charakteryzować się odpowiednią ciągliwością tzn. mieć odpowiednią zdolność do poślizgu.

2. Szytywność sworzni w ujęciu normowym

W przypadku zastosowania węzłów podatnych na szytywność węzła i charakterystykę moment-kąt obrotu (M-Ø), a tym samym na wartości sił wewnętrznych w elementach, wpływ będzie miała wartość poślizgu w płaszczyźnie zespolenia, co z kolei zależy m.in. od szytywności zastosowanych łączników. W myśl postanowień normy [15] przy braku dokładnych analiz odkształceń połączenia ścinanego wpływ poślizgu może być uwzględniony poprzez przemnożenie współczynnika szytywności prętów zbrojenia $k_{s,r}$ przez współczynnik redukcyjny k_{slip} wyrażony wzorem (1).

$$k_{slip} = \frac{1}{1 + \frac{E_s k_{s,r}}{K_{sc}}} \quad (1)$$

w którym:

$$K_{sc} = \frac{N k_{sc}}{v - \left(\frac{v-1}{1+\xi} \right) \frac{h_s}{d_s}} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{(1+\xi) N k_{sc} \ell d_s^2}{E_a I_a}} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{E_a I_a}{d_s^2 E_s A_s} \quad (4)$$

gdzie: $k_{s,r}$ – współczynnik szytywności określony wzorami zamieszczonymi w tablicy

A.1 normy [15] zależny od rodzaju węzła (jednostronny/dwustronny obciążony symetrycznie/dwustronny obciążony niesymetrycznie);

E_s, A_s – moduł sprężystości i pole przekroju zbrojenia;

N – liczba łączników ścinanych rozmieszczonych na długości l ;

h_s – odległość pomiędzy prętami podłużnego zbrojenia rozciąganego a środkiem ściskania;

d_s – odległość pomiędzy prętami podłużnego zbrojenia rozciąganego a środkiem przekroju stalowej belki;

l – długość belki w strefie momentu ujemnego sąsiadującej z węzłem, która w ramie stężonej może być przyjęta jako 15 % długości przęsła;

E_a, I_a – moduł sprężystości i moment bezwładności przekroju stalowej belki.

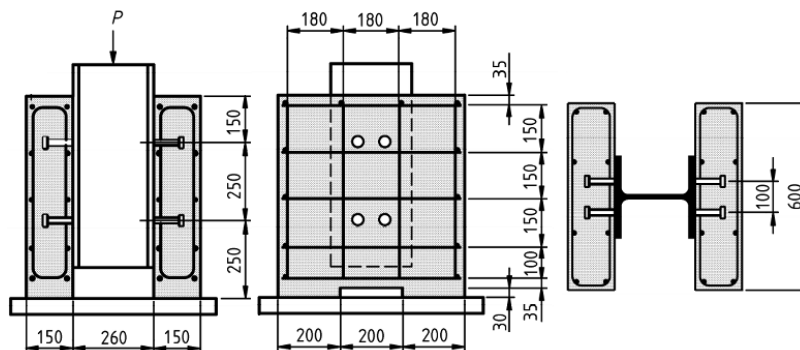
We wzorze (1) na współczynnik redukcyjny istotny wpływ ma wartość sztywności pojedynczego łącznika, którą można określić ze wzoru:

$$k_{sc} = \frac{0,7P_{Rk}}{s} \quad (5)$$

gdzie: s – poślizg określony z badań zgodnie z załącznikiem B normy [15], przy obciążeniu równym $0,7P_{Rk}$,

P_{Rk} – charakterystyczna nośność łącznika ścinanego.

Norma konstrukcji zespolonych [15] definiuje dwa sposoby badania łączników na ścinanie – badania standardowe i badania specjalne. Badania standardowe można przeprowadzić w przypadku belki zespolonej o przekroju teowym z płytą betonową o jednakowej grubości lub jeżeli skosy w płycie są zgodne z wymaganiami normy. Schemat stanowiska badawczego dla badania standardowego pokazano na rys. 2. W przypadku badań specjalnych powinny być prowadzone one w taki sposób, aby betonowe płyty i zbrojenie odpowiadały wyjściowej belce. Jeżeli badania przeprowadzone zostały na min. 3 próbkach, a odchylenie pojedynczego wyniku od wartości średniej nie przekracza 10% wówczas nośność charakterystyczną łącznika P_{Rk} określa się według [15] jako minimalne obciążenie niszczące (podzielone przez liczbę łączników) pomniejszone o 10%.



Rys. 2. Próbką do standardowych badań na ścinanie

Fig. 2. Test specimen for standard push test

Ponadto w normie [15] w p. A.3.(4) znajduje się zapis, iż dla płyty pełnej lub płyty zespolonej, której współczynnik redukcyjny k_r jest równy 1,0 przy zastosowaniu sworzni główekowych o średnicy 19 mm sztywność pojedynczego sworznia można przyjąć równą 100 kN/mm.

Współczynnik redukcyjny k_r wyrażony jest wzorem (6):

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \frac{b_o}{h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right) \quad (6)$$

gdzie: n_r – liczba sworzni w jednej bruździe na skrzyżowaniu z belką, w obliczeniach nie większa od dwóch;

b_o – w przypadku blachy o profilu wklęsłym („jaskółczy ogon”) – najmniejsza szerokość w fałdzie, w przypadku blachy o geometrii trapezowej – średnia szerokość fałdy

h_p – wysokość fałdy blachy;

h_{sc} – wysokość sworznia.

Przy uwzględnieniu ograniczenia dotyczącego maksymalnych wartości współczynnika k_t (tablica 6.2 w [15]) okazuje się, że powyższy zapis w stropach na blachach fałdowych, odnosi się tylko do przypadków, w których liczba sworzni przypadających na jedno żebro jest nie większa niż 1, grubość blachy jest powyżej 1 mm, a sworznie spawane są przez blachę stalową (wyklucza to profilowaną blachę z otworami oraz blachy o grubości 1,0 mm i mniejszej). W tabeli 1 przedstawiono przykładowe typy blach fałdowych, które były bądź są stosowane na rynku polskim (również te o grubości mniejszej lub równej 1,0 mm) wraz z minimalną wysokością sworznia potrzebną, aby współczynnik k_t obliczony ze wzoru (6) wynosił 1,0.

Tabela 1. Minimalna wysokość sworzni, przy której współczynnik redukcji k_t wynosił będzie 1,0 dla wybranych blach fałdowych (z pominięciem warunku minimalnej grubości blachy)

Table 1. The minimum height of the headed studs, at which the reduction factor k_t is 1,0 for selected profiled steel deck (without the condition of a minimum thickness of profiled steel deck)

Typ blachy	Dostępne grubości	Min. wysokość sworznia
	[mm]	[mm]
Cofraplus 60, FLORSTROP T-59 Z	0,75; 0,88; 1,00, 1,25	120
Cofraplus 77	0,75; 0,88; 1,00	180
Cofraastra 40	0,75; 0,85	60
Cofraastra 70	0,75; 0,88; 1,00	150
Holorib HR51, SHR51	0,75; 0,88; 1,00, 1,25	90
RUUKI Composite sheet CS48-36-750	0,70; 0,90; 1,10	70

Jak można zauważyć, zastosowanie przedstawionej w normie sztywności pojedynczego sworznia o wartości 100 kN/mm jest ograniczone do bardzo wąskiego asortymentu blach (grubości blach spełniające kryteria normowe zostały w tabeli oznaczone grubszą czcionką). Ponadto sztywność sworznia zależy będzie także m.in. od kształtu blachy, położenia sworznia w fałdzie (centralne bądź przesunięte), jego smukłości czy klasy betonu.

W tabeli 2 i tabeli 3 przedstawiono wybrane wyniki badań sztywności sworzni o średnicy 19 mm zarówno w płycie pełnej (tabela 2), jak i w płycie na blachach fałdowych (tabela 3) zaczerpnięte z literatury, a w tabeli 4 wyniki badań dla innych średnic sworzni.

Table 2. The stiffness of the headed studs with 19 mm diameter in the full slab including the selected parameters on the basis of test results

Autor	Wymiary sworznia	Smukłość sworznia k_{ed}	Beton	Grubość płyty	$0,9P_{rk}$	Sztywność sworznia k_{sc}	Ilość elementów badawczych
	[mm]	[-]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[kN/mm]	[-]
D. Lam, E. El-Lobody, 2005, [7]	19x95	5,0	20-50	150	64,4-117,4	ok. 90-145	4
D. Lam, 2007, [8]	19x100	5,3	15,3	150	64,5	ok. 95	1
	19x100	5,3	28-29,1		90,1-92,3	ok. 145-220	3
	19x100	5,3	50,1		111,9	ok. 265	1
I. B. Valente, P. J.S. Cruz, 2009, [20]	19x100	5,3	54,2-56,0	150	125,5-126,9	ok. 180-195	3
	19x100*	5,3	54,7-63,1		107,6-109,8	ok. 135-245	3
H.B. Shim i in., 2010, [17]	19x135	7,1	102,7	300	261,2	ok. 345	1

* 2 sworznie obok siebie,
 ** sztywność sworznia wyznaczona na podstawie krzywej siła - poślizg

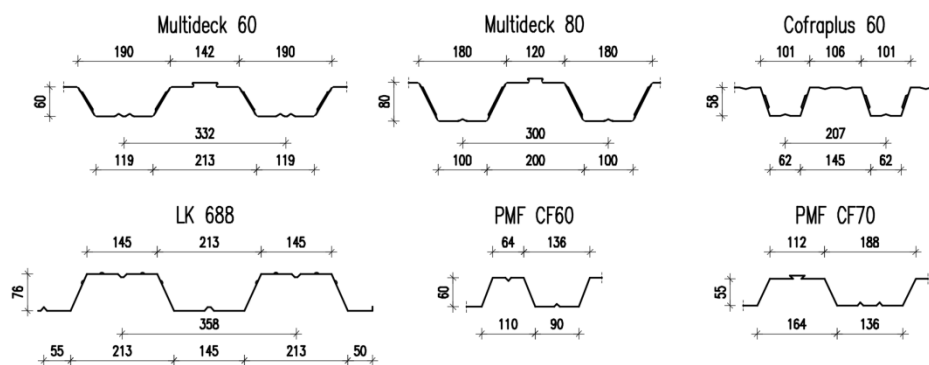
Tabela 3. Szytywność sworzni główkowych o średnicy 19 mm w płycie na blachach fałdowych wraz z wybranymi parametrami na podstawie wyników badań

Table 3. The stiffness of the headed studs with 19 mm diameter in the profiled steel sheeting slab including the selected parameters on the basis of test results

Autor	Wymiary sworznia	Smukłość sworznia- h/d	Beton	Grubość płyty	Współczynnik redukcyjny k_t	$0,9P_k$	Szytywność sworznia ** k_{sc}	Ilość elementów badawczych
	[mm]	[-]						
H.Yuan, 1996, [22]	19x125	6,6	29,6-35	150 ²	0,49; 0,69	54,7-82,7	ok. 75-170	4
			27,3	140 ⁴	0,85	79,6	ok. 115	1
	19x95	5,0	27,3-36,9	120 ³	0,70; 0,85	45,6-60,1	ok. 45-220	3
A.L. Smith i in., 2010, [19]	19x95	5,0	24,3	140 ¹	0,85	109,4	ok. 215	1
K. Cashell, 2013, [2]	19x95	5,0	29,6-41,3	150 ⁶	0,63	52,1-60,9	ok. 55-200	6
			35,8-44,4	150 ^{6*}	0,63	39,3-52,8	ok. 80-200	2
L. Z. Chen i in., 2015, [3]	19x100	5,3	42,2	150 ⁵	0,52	53,9-55,4	ok. 40-45	2

* geometria jak dla blachy dla stropów zespolonych, ale bez wytłoczeń
 ** sztywność sworznia wyznaczona na podstawie krzywej siła - poślizg
 Typ blachy fałdowej: 1- Multideck 60, 2- Multideck 80, 3- PMF CF60, 4- PMF CF70, 5- LK-688, 6- Cofraplus 60

Geometria blach zastosowana w badaniach wymienionych w tabeli 3 przedstawiona została na rys. 3.



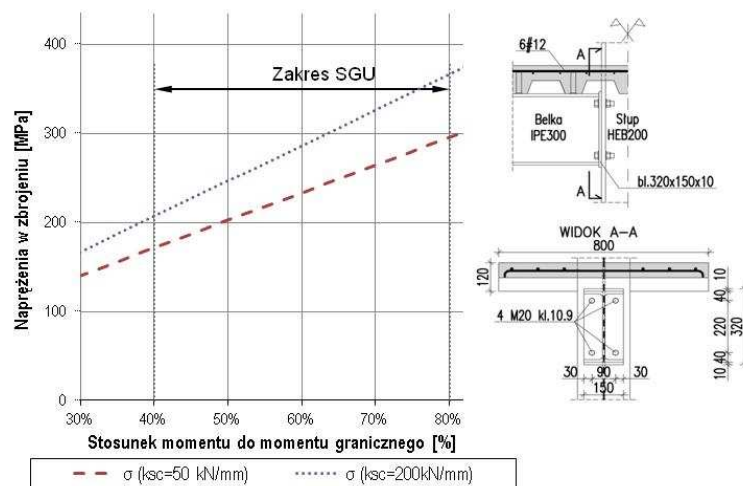
Rys. 3. Kształt blach stosowanych w badaniach wymienionych w tablicy 3

Fig. 3. The shape of the profiled steel sheeting used in the tests in table 3

4. Wpływ sztywności sworzni na naprężenia w zbrojeniu dla wybranego węzła

W konstrukcjach zespolonych, w których płyta znajduje się w strefie rozciąganej, projektant oprócz nośności elementu (np. węzła czy płyty) staje także przed koniecznością sprawdzenia zarysowania. Analizując stan graniczny zarysowania należy uwzględnić charakterystyczne obciążenia długotrwałe. W realnych budowlach stosunek tego obciążenia do obciążenia granicznego ze względu na nośność może wahać się w szerokich granicach w zależności od takich czynników jak ciężar warstw wykończeniowych czy wielkość obciążenia zmiennego i udział obciążeń długotrwałych w obciążeniu zmiennym i wynosić może od 40% do 80% nośności obliczeniowej elementu.

Na rys. 4 przedstawiono wartość naprężeń w zbrojeniu dla pewnego typu węzła (pokazanego obok wykresu) przy dwóch wartościach sztywności sworzni: 50 kN/mm (linia przerywana) oraz 200 kN/mm (linia kropkowana). Do obliczeń przyjęto stal konstrukcyjną o charakterystycznej wytrzymałości 235 MPa, stal zbrojeniową o charakterystycznej granicy plastyczności 500 MPa, beton C25/30. Jako schemat statyczny przyjęto ramę dwuwspornikową o wysokości wspornika 1,66 m, a ilość sworzni łączących płytę wynosiła 8 sztuk z każdej strony podpory. Zakres obciążeń występujących w stanie granicznym użytkowości oznaczono strzałkami na rysunku jako „zakres SGU”.



Rys. 4. Wpływ sztywności sworzni na naprężeniu w zbrojeniu dla pewnego typu węzła

Fig. 4. The influence of the stiffness of headed stud on the tension in the reinforcement for a certain type of joint

Naprężenia w stali wyznaczono rozpatrując równowagę węzła korzystając z metody składnikowej opisanej w normach [14], [15], a dokładniej omówionej np. w [1], [11]. Wyprowadzenie wzoru na naprężenia znaleźć można m.in. w [11]. Do tak obliczonych naprężeń dodano składnik związany ze zjawiskiem „tension stiffening” zgodnie z zaleceniami [15].

Jak można zauważyć, im większe wyężenie elementu rozumiane, jako stosunek działającego momentu zginającego do momentu granicznego, tym większa różnica w naprężeniach w zbrojeniu w zależności od przyjętej sztywności sworzni. Dla porównywanego węzła i wyężenia sięgającego 80% różnica ta wynosi ok. 70 MPa, co stanowi ok. 14% charakterystycznej granicy plastyczności stali zbrojeniowej, co z kolei ma wpływ na obliczoną szerokość rysy.

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono zagadnienie sztywności sworzni główkowych stosowanych do zespolenia pomiędzy kształtownikiem stalowym a płytą betonową. Czynnikiem ten jest „słabo zdefiniowany” w Eurokodzie. Aktualna norma [15] sugeruje przyjęcie sztywności łącznika równej 100 kN/mm nie różniącą tej wartości ze względu na długość sworzni, stosunek grubości płyty w fałdzie do grubości ponad fałdą, czy klasę betonu i ograniczając tę wartość do niewielu blach fałdowych (ze względu na wartość współczynnika k_t).

Porównanie wybranych wyników badań zamieszczone w tabeli 2 i tabeli 3 wskazuje, iż sztywność pojedynczego łącznika o średnicy 19 mm wyznaczona z zależności krzywa poślizg może być różna. W przytoczonych badaniach wynosiła od 90 kN/mm do 245 kN/mm przy zastosowaniu betonu o normalnej wytrzymałości, do nawet 345 kN/mm w przypadku betonu o wysokiej wytrzymałości. Dla stropów na blasze fałdowej było to od ok. 45 kN/mm do 220 kN/mm. Zamieszczone wyniki badań, zaczerpnięte z literatury, nie mogą służyć do wiarygodnych uogólnień, ale jedynie jako wskazówka w doborze sztywności sworzni w sytuacjach podobnych do tych, jakie ujęto w pracy (w przypadku braku możliwości zastosowania wartości przedstawionej w normie w przypadku stropów na blachach fałdowych ograniczonej dla bardzo wąskiego asortymentu blach).

Literatura

- [1] Barcewicz W., Giżejowski M.: Component method for determining joint properties – steel and composite joints subjected to hogging and sagging bending, Proceedings of the 7th European Conference on steel and composite structures EUROSTEEL 2014, eds: R. Randalfo, F.M. Mazzolani, ECCS, Neapol 2014, nr referatu 02-314.
- [2] Cashell K.: Structural Applications of Ferritic Stainless Steels (SAFSS) Work Package 3.4., 2013, <http://www.steel-stainless.org/Content/Files/Ferritics/SAFSS-03-04.pdf> [dostęp: 2015.11.09].

- [3] Chen L. Z., Ranzi G., Jiang S. C., Tahmasebinia F., Li G. Q.: Behaviour and design of shear connectors in composite slabs at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, 115 (2015), 387-397.
- [4] Han Q. Wang, Y., Xu, J., Xing, Y.: Static behavior of stud shear connectors in elastic concrete-steel composite beams, *Journal of Constructional Steel Research* 113 (2015): 115-126.
- [5] Kucharczuk W.: *Belki zespolone stalowo – betonowe w konstrukcjach budowlanych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2001.
- [6] Kucharczuk W., Labocha S.: *Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe budynków*, Arkady, Warszawa 2008.
- [7] Lam D., El-Lobody E.: Behavior of headed stud shear connectors in composite beam, *Journal of Structural Engineering* 131.1 (2005), 96-107.
- [8] Lam D.: Capacities of headed stud shear connectors in composite steel beams with precast hollowcore slabs, *Journal of Constructional Steel Research* 63.9 (2007), 1160-1174.
- [9] Nawrot J.: Badania nowego połączenia ścinanego zespolonej belki stalowo - betonowej, *Konstrukcje stalowe* 3(92), 2008.
- [10] Nawrot J., Kucharczuk W.: Badanie nośności nowych łączników do zespolonych stropów stalowo - betonowych, *Inżynieria i Budownictwo*, 12/2004.
- [11] Niedośpiał M.: Nośność i odkształcalność węzłów stalowo-betonowych stropów zespolonych – rola żelbetu, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2013.
- [12] PN-B-03300:1982: Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Belki zespolone krępe.
- [13] PN-B-03300:2006: Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [14] PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [15] PN-EN 1994-1-1:2008 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [16] PN-EN ISO 13918: Spawanie. Kołki i pierścienie ceramiczne do zgrzewania łukowego kołków.
- [17] Shim H. B., Chung K. S., Jang S. H., Park S. J., Lee J. H.: Push-out tests on shear studs in high strength concrete. Proc. 7th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures (FraMCoS-7), Jeju, Korea. 2010. <http://www.framcos.org/FraMCoS-7/06-10.pdf> [dostęp 5 grudnia 2015 r.].
- [18] Shim C. S., Lee P. G., Yoon T. Y.: Static behavior of large stud shear connectors. *Engineering structures*, 26(12), 2004, 1853-1860.
- [19] Smith A. L., Couchman G. H.: Strength and ductility of headed stud shear connectors in profiled steel sheeting, *Journal of Constructional Steel Research* 66.6 (2010), 748-754.
- [20] Valente, I. B., Cruz P.J.: Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete, *Journal of Constructional Steel Research* 65.10 (2009): 1954-1963.

- [21] Xue D., Liu Y., Yu Z., He J.: Static behavior of multi-stud shear connectors for steel-concrete composite bridge, *Journal of Constructional Steel Research* 74 (2012): 1-7.
- [22] Yuan H, The resistances of stud shear connectors with profiled sheeting, PhD thesis, University of Warwick. 1996, <http://go.warwick.ac.uk/wrap/36287>, [dostęp 4 stycznia 2016 r.].

THE STIFFNESS OF HEADED STUDS IN THE STEEL-CONCRETE COMPOSITE ELEMENTS - RECOMMENDATIONS OF THE STANDARD IN COMPARISON TO THE TEST RESULTS

Summary

In this paper presents the problem of stiffness the headed studs in composite slabs are reported. The standard of composite structures (Eurocode 4) suggests a stiffness of the headed stud 19 mm connector equal to 100 kN/mm without differentiating the value due to the length headed stud, the ratio of slab thickness to the profiled steel sheeting height or concrete strength. Analyzing the assortment of profiled steel sheets used in composite slabs, it turns out that the above value can be applied to a very narrow set of profiled steel sheets. For other diameters of headed studs this value should be determined experimentally. The stiffness of headed stud will have an effect on the M- ϕ characteristic of the joint (and thus the internal forces in the case semi-rigid joints) and the tension in the reinforcement bars (and thus the width of the cracks). The article provides an overview of research available in the papers and presents the results of stiffness studs derived from force - slip relationship. These results can provide guidance and assistance to designers in the analysis of composite structures.

Keywords: headed stud shear connectors, stiffness of headed stud, steel-concrete composite structure, semi-rigid joint, profiled steel sheeting, push-out tests

Przesłano do redakcji: 24.10.2016 r.

Przyjęto do druku: 31.03.2017 r.