

Jacek NAWROT

Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

WPŁYW WYBORU KONSTRUKCJI STROPU W SZKIELETOWYCH BUDYNKACH STALOWYCH NA POZIOM ODDZIAŁYWANIA NA ŚRODOWISKO

W niniejszej publikacji przeprowadzono analizę wybranych rodzajów stropów pod kątem poziomu oddziaływania na środowisko. Zaproponowano dwa różne rozwiązania konstrukcyjne dla przyjętych założeń. Określono masę konstrukcji stalowej dla rozważanych wariantów. Obliczono i porównano wielkość emisji CO₂ oraz energochłonność związaną z wykonaniem analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: stropy stalowo-betonowe, energochłonność, emisja CO₂

WPROWADZENIE

Zgodnie z założeniami budownictwa zrównoważonego, za budynek idealny można uważać obiekt, którego oddziaływanie na środowisko byłoby neutralne lub jak najmniej negatywne. Biorąc pod uwagę ten czynnik, najbardziej ekologicznym rodzajem konstrukcji są konstrukcje drewniane. Jednak z uwagi na względy przeciwpożarowe, sposób eksploatacji obiektu czy wymaganą nośność konstrukcji budynku, stosowanie konstrukcji drewnianych w stalowych budynkach szkieletowych jest dość ograniczone. W takim przypadku spośród pozostałych rozwiązań należy wybrać te, których poziom oddziaływania na środowisko będzie jak najmniej niekorzystny. Jest wiele czynników wpływających na poziom oddziaływania (energochłonność, wielkość emisji CO₂, poziom hałasu, ilość odpadów generowana w procesie produkcji, zdolność do ponownego przetworzenia (recyklingu), emisja pyłów zawieszonych itp.). W niniejszym artykule skupiono się na dwóch spośród nich, które w miarę precyzyjnie można oszacować: energochłonności i wielkości emisji CO₂, związanych z wytworzeniem elementów konstrukcyjnych analizowanych rozwiązań.

W stalowych budynkach szkieletowych procentowy udział poszczególnych elementów w ogólnej masie konstrukcji obiektu przedstawia się następująco: słupy 40÷60%, belki stropowe 30÷50%, schody i szyby dźwigów 3÷6%, tężniki 2÷7% [6]. Bez względu na układ konstrukcyjny budynku sposób wykonania słupów (gorącowalcowane kształtowniki stalowe) oraz ich wielkość są podobne. Elementem, który z uwagi na przyjęte rozwiązanie ma decydujący wpływ na masę konstrukcji budyn-

ku, jest strop. W szkieletowych budynkach stalowych konstrukcję stropu stanowią belki stalowe, na których wykonana jest monolityczna lub prefabrykowana płyta żelbetowa. W niniejszej pracy przeanalizowano pod kątem wielkości emisji CO₂ oraz energochłonności dwa, najczęściej stosowane w tego typu obiektach, rozwiązania konstrukcyjne stropów stalowo-betonowych.

Podstawowym parametrem świadczącym o poprawności przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego stropu, a także o jego efektywności ekonomicznej jest masa konstrukcji, wyrażana zazwyczaj w postaci wskaźnika zużycia stali na m² powierzchni. W niniejszej pracy oszacowano zależność między masą konstrukcji stalowej rozważanych stropów a energochłonnością i wielkością emisji CO₂, związanych z ich wykonaniem.

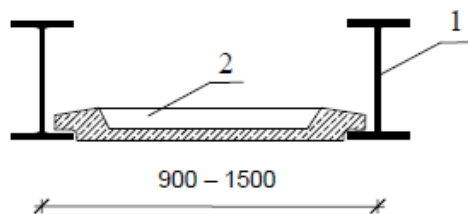
1. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE STROPÓW BUDYNKÓW

1.1. Wiadomości wstępne

Wybór konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego stropu zależy głównie od funkcji budynku oraz rozstawu słupów [6]. W budynkach mieszkalnych oraz użyteczności publicznej najczęściej stosuje się stropy z pustaków lub żelbetowe. W szkieletowych budynkach stalowych, gdzie jednym z istotnych czynników obciążeń mogą być oddziaływania dynamiczne, stosuje się zazwyczaj stropy płytowo-belkowe, których głównymi elementami konstrukcyjnymi są stalowe belki stropowe (żebra i podciągi) oraz oparta na nich płyta żelbetowa. Takie rozwiązanie (z uwagi na wysoki stopień prefabrykacji konstrukcji) pozwala dość znacznie skrócić czas wykonywania prac montażowych, co przekłada się na skrócenie czasu realizacji obiektu.

1.2. Stropy WPS

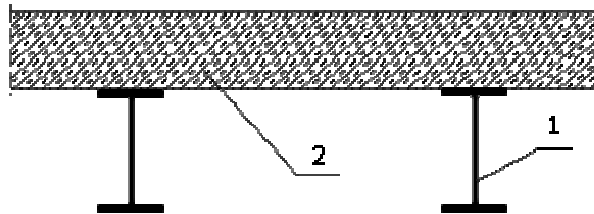
Głównymi elementami nośnymi stropu są gorącowalcowane dwuteowniki stalowe, mocowane do słupów lub oparte na ścianach nośnych budynku. Na dolnych półkach kształtowników stalowych układa się prefabrykowane płyty żelbetowe WPS o rozpiętości dostosowanej do rozstawu belek, który wynosi od 900 do 1500 mm (rys. 1).



Rys. 1. Strop WPS: 1 - belka stalowa, 2 - prefabrykowana płyta stropowa WPS

1.3. Stropy belkowo-płytowe

Stropy te należą do jednych z najczęściej stosowanych rozwiązań w stalowych budynkach szkieletowych. Głównymi elementami konstrukcji stropu są belki stalowe (najczęściej dwuteowniki). W przypadku stropów o małej rozpiętości (ok 7÷8 m) stosuje się jeden rodzaj belek (żebra), które opiera się bezpośrednio na ścianach podłużnych budynku (rys. 2).

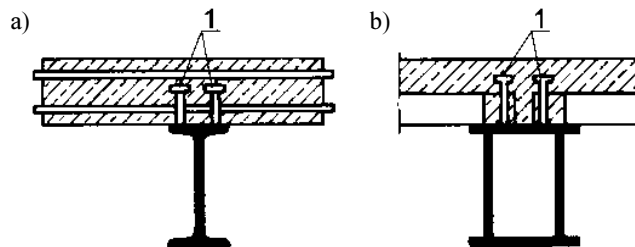


Rys. 2. Strop płytowo-belkowy: 1 - belka stalowa (żebro), 2 - żelbetowa płyta stropowa

Przy większych rozpiętościach oprócz żebier występują także podciąg, podparte słupami i stanowiące oparcie dla żebier. Obecnie konstrukcje tego typu są coraz częściej zastępowane stalowo-betonowymi stropami.

1.4. Stalowo-betonowy strop zespolony

Coraz większą popularność w ostatnich latach zyskują stalowo-betonowe stropy zespolone, szczególnie w szkieletowych budynkach wysokich, wypierając tradycyjne stropy żelbetowe [4]. W stropach tych prefabrykowana lub monolityczna płyta żelbetowa połączona jest w sposób trwały (zespolona) z belką stalową (rys. 3).



Rys. 3. Stalowo-betonowy strop zespolony: a) z płytą monolityczną, b) z płytą prefabrykowaną; 1- łącznik sworzniowy [5]

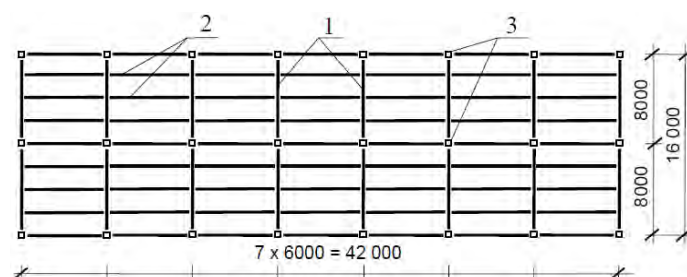
Dzięki temu uzyskiwany jest jeden (choć niejednorodny) przekrój, posiadający jedną oś obojętną. W przekroju przeszłowym górna jego część (beton) przenosi naprężenia ściskające, dolna (kształtownik stalowy) przenosi naprężenia rozciągające. Można łatwo wykazać, że w przekroju zespolonym wartość naprężeń normalnych jest dwukrotnie mniejsza, a ugięcie czterokrotnie mniejsze w porównaniu do analogicznego przekroju niezespolonego, gdzie oba komponenty (płyta i belka)

mogą się swobodnie przemieszczać względem siebie [5]. W związku z tym, wskaźnik zużycia stali konstrukcyjnej na m^2 powierzchni dla stropów zespolonych ma mniejszą wartość niż dla tradycyjnych stropów belkowo-płytowych.

2. ANALIZOWANE RODZAJE STROPÓW

2.1. Założenia

Analizie poddano strop jednej kondygnacji szkieletowego budynku o konstrukcji stalowej i funkcji biurowej. Założono wymiary rzutu budynku 16×42 m (rys. 4), co daje powierzchnię stropu równą 672 m^2 . Konstrukcję stropu stanowią belki główne (podciągi) o rozpiętości 8 m i rozstawie 6 m oraz belki drugorzędne (żebra) o rozpiętości 6 m i rozstawie 2 m, stal konstrukcyjna S235. Rozstaw żebier, warunkujący rozpiętość przęsła płyty stropowej, ustalono na podstawie obliczeń wytrzymałościowych wykonanych zgodnie z [7] oraz [8]. Żelbetowa płyta stropowa o grubości 10 cm wykonana jest z betonu C20/25.



Rys. 4. Rzut analizowanego stropu: 1 - podciągi, 2 - żebra, 3 - słupy

Przyjęto typowy układ warstw wykończeniowych stosowany w stropach stalowych budynków szkieletowych o funkcji biurowej:

- płytki ceramiczne,
- wylewka cementowa gr. 5 cm
- folia PCV
- styropian gr. 5 cm
- papa izolacyjna
- płyta żelbetowa gr. 10 cm

Charakterystyczna wartość ciężaru warstw wykończeniowych (razem z płytą) wynosi $3,87 \text{ kN/m}^2$, przyjęte obciążenie użytkowe równe $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Do dalszej analizy przyjęto dwa warianty konstrukcji obecnie najczęściej stosowane w stalowych budynkach szkieletowych: tradycyjny strop belkowo-płytowy oraz stalowo-betonowy strop zespolony. W analizie pominięto warstwy wykończeniowe oraz żelbetową płytę stalową, gdyż są one identyczne dla obu analizowanych stropów. W związku z tym energochłonność i wielkość emisji CO_2 związana z ich wykonaniem nie będzie miała na wybór rozwiązania korzystniejszego z uwagi na poziom oddziaływania na środowisko.

2.2. Masa stali dla wariantu 1 - stropu belkowo-płytowego

Przyjęto, że belki stropowe wykonane będą z gorącowalcowanych dwuteowników równoległościennych IPE. Na podstawie obliczeń przeprowadzonych zgodnie z [7] ustalono wymagane przekroje belek stropowych:

- podciąg: IPE 500
- żebro: IPE 270

Całkowita masa stali konstrukcyjnej dla stropu jednej kondygnacji wynosi 25 255,4 kg (tab. 1), co daje wskaźnik zużycia stali na poziomie 37,58 kg/m².

2.3. Masa stali dla wariantu 2 - stalowo-betonowego stropu zespolonego

Założono tak jak dla wariantu pierwszego belki stropowe w postaci dwuteowników IPE. Zespolenie płyty z belką zapewniono za pomocą łączników sworzniowych. Na podstawie obliczeń wykonanych zgodnie z [8] ustalono wymagane przekroje belek stropowych:

- podciąg: IPE 180
- żebro: IPE 360
- łącznik sworzniowy Ø 16 o wysokości 80 mm

Całkowita masa stali konstrukcyjnej dla jednej kondygnacji wynosi 14 574,5 kg (tab. 1), co daje wskaźnik zużycia stali na poziomie 21,69 kg/m².

Tabela 1. Masa belek analizowanych stropów

Typ stropu	Rodzaj elementu	Typ kształtownika	Masa / 1 kondygnację [kg]
Tradycyjny strop belkowo-płytowy	żebro	IPE 270	13 645,8
	podciąg	IPE 500	11 609,6
	Razem:		25 255,4
Strop zespolony	żebro	IPE 180	7106,4
	podciąg	IPE 360	7308,8
	łącznik	Ø 16	159,3
	Razem:		14 574,5

3. ANALIZA ENERGOCHŁONNOŚCI I EMISJI CO₂

3.1. Wiadomości wstępne

Istotnymi czynnikami mającymi wpływ na poziom oddziaływania na środowisko obiektu budowlanego jest energochłonność oraz wielkość emisji CO₂ związane z jego wytworzeniem.

Energochłonność to ilość energii niezbędna do wytworzenia materiałów, z jakich obiekt budowlany jest wykonany, ich transportu oraz montażu. Ponieważ w niniej-

szej pracy analizowana jest zależność między przyjętym rozwiązaniem konstrukcyjnym stropu belkowego a jego wpływem na środowisko, ograniczono się do analizy energochłonności związanej z produkcją kształtowników stalowych stanowiących belki tych stropów (płyty betonowe w takich stropach mają podobną konstrukcję i zbliżone wymiary). Energochłonność produkcji stalowej w polskim hutnictwie ciągle spada, ale pozostaje relatywnie dość wysoka w porównaniu do innych materiałów budowlanych. W 2014 r. jednostkowe zużycie energii w produkcji stali wyniosło 0,197 toe/tonę stali [2], gdzie toe to umowna jednostka energochłonności równa tonie oleju ekwiwalentnego - 1 toe odpowiada 41,86 GJ lub 11 647 kWh [3]. W związku z tym, aby ograniczyć energochłonność wykonania obiektu i tym samym koszty realizacji inwestycji, w stalowych konstrukcjach budowlanych należy dążyć do stosowania rozwiązań minimalizujących masę elementów nośnych.

Wytworzenie każdego materiału budowlanego wiąże się nie tylko z zapotrzebowaniem na energię, ale także z emisją CO₂, do której dochodzi podczas jego produkcji. Zawartość dwutlenku węgla w podstawowych materiałach budowlanych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zawartość CO₂ w podstawowych materiałach budowlanych [1]

Rodzaj materiału	Zawartość CO ₂ [kg CO ₂ /m ³]
Stal	12 200
Beton	385
Ceramika budowlana	375
Drewno	-900

Najbardziej ekologicznym materiałem jest drewno, które ma ujemną wartość emisji CO₂, co wiąże się z absorpcją dwutlenku węgla podczas wzrostu drzewa. Materiałem, którego produkcji towarzyszy największa emisja CO₂, jest stal. Z punktu widzenia ochrony środowiska powinno się dążyć do ograniczenia jej stosowania. Jednak poza konstrukcjami drewnianymi, które mają dość ograniczone zastosowanie (szczególnie w budownictwie przemysłowym), nie ma obecnie alternatywy dla stalowych wyrobów budowlanych. W obiektach, w których zastosowanie elementów stalowych jest nieodzowne, należy wybierać takie rozwiązania konstrukcyjne, które zarówno ze względów ekonomicznych, jak i ograniczenia negatywnego oddziaływania na środowisko będą najkorzystniejsze.

3.2. Określenie wielkości emisji CO₂ i energochłonności

Dla ustalonej na podstawie obliczeń masy belek (pkt. 2.2 i 2.3), dla rozważanych wariantów konstrukcji stropów oszacowano wielkość emisji CO₂ związanej z ich produkcją oraz energochłonność ich wytworzenia.

Wielkość emisji CO₂ obliczono, dzieląc masę belek przez ciężar właściwy stali równy 7850 kg/m³ i mnożąc przez zawartość CO₂ w 1 m³ stali (12 200 kg CO₂/m³ - zgodnie z tabelą 2). Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wielkość emisji CO₂ dla belek stalowych analizowanych stropów

Typ stropu	Wielkość emisji CO ₂ [kg CO ₂ /m ³]
Strop belkowo-płytowy	39 143,46
Strop zespolony	22 374,56

Chociaż z przyczyn wymienionych w pkt. 2.1 w powyższej analizie nie uwzględniono żelbetowej płyty stropowej, policzono dla niej wartość emisji CO₂, aby zorientować się, jaka będzie wartość tego parametru dla kompletnej konstrukcji stropu. Obliczenia sporządzono w analogiczny sposób jak dla belek stalowych, przyjmując zawartość CO₂ w 1 m³ betonu (385 kg CO₂/m³ - zgodnie z tabelą 2) i mnożąc ją przez objętość płyty dla jednej kondygnacji. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wielkość emisji CO₂ dla płyty stropowej

Rodzaj elementu konstrukcyjnego	Wielkość emisji CO ₂ [kg CO ₂ /m ³]
Żelbetowa płyta stropowa	25 872,00

Energochłonność obliczono jako iloczyn masy belek stropowych i jednostkowe zużycie energii w produkcji stali równe 0,197 toe.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla analizowanych stropów przedstawiono w tabeli 5.

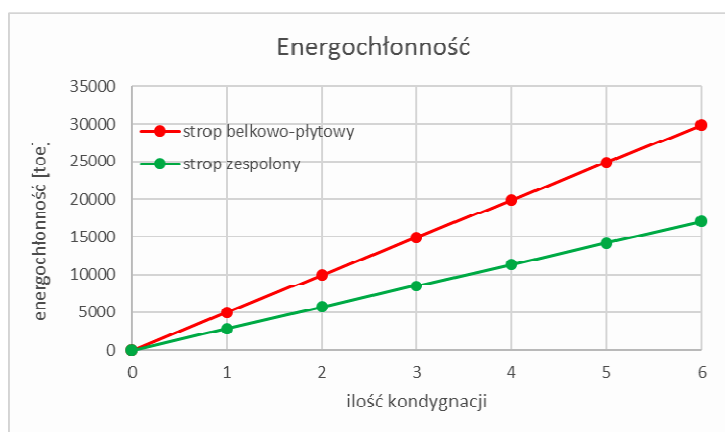
Tabela 5. Wielkości emisji CO₂ oraz energochłonności dla konstrukcji analizowanych stropów

Typ stropu	Energochłonność [toe]	Wielkość emisji CO ₂ [kg CO ₂ /m ³]
Strop belkowo-płytowy	4975,31	65 015,46
Strop zespolony	2839,79	48 246,56

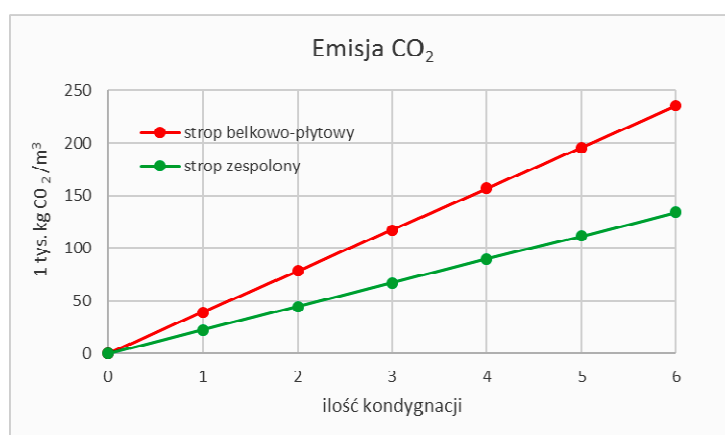
Nie oszacowano energochłonności wykonania płyty żelbetowej z uwagi na brak materiałów źródłowych dotyczących jednostkowego zużycia energii w produkcji betonu. Wynika to z wieloetapowego i bardziej zdecentralizowanego (niż w przypadku stali) procesu produkcji betonu, na który składa się: produkcja i transport cementu do wytwórni, wydobycie i dostawa kruszywa, wykonanie mieszanki betonowej, jej transport do miejsca zabudowania. Jednak tak jak wspomniano wcześniej, ponieważ ta sama żelbetowa płyta stropowa występuje w obu rozważanych wariantach stropów, energochłonność jej wykonania nie będzie miała wpływu na wybór rozwiązania korzystniejszego z uwagi na poziom oddziaływania na środowisko.

Podane w tabeli 5 wartości energochłonności wytworzenia oraz wielkości emisji CO₂ dotyczą tylko masy belek stalowych jednej kondygnacji. Budynki

szkieletowe z zasady są obiektami wielokondygnacyjnymi, w związku z tym wraz ze wzrostem ilości kondygnacji dysproporcja między analizowanymi wartościami dla rozważanych typów stropów będzie się pogłębiać. Na rysunkach 5 i 6 pokazano, jak zmieniają się wartości energochłonności i wielkości emisji CO₂ w zależności od ilości kondygnacji budynku.



Rys. 5. Zależność między energochłonnością wytworzenia belek stropowych a liczbą kondygnacji budynku dla analizowanych stropów



Rys. 6. Zależność między wielkością emisji CO₂ towarzyszącej produkcji belek stropowych a liczbą kondygnacji dla analizowanych stropów

PODSUMOWANIE, WNIOSKI

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonej analizy, można stwierdzić, iż najefektywniejszą (pod kątem poziomu oddziaływania na środowisko) konstrukcją stropu belkowego będzie taka, którą cechuje jak najmniejsze zużycie materiałów. W przypadku stalowo-betonowych stropów belkowych materiałem, na który należy

zwrócić szczególną uwagę, jest stal konstrukcyjna (płyty betonowe oraz warstwy wykończeniowe w takich stropach są podobne i mają zbliżone wymiary). Wiąże się to z wysoką energochłonnością wytworzenia wyrobów stalowych (belek stropowych) oraz bardzo dużym poziomem emisji CO₂, towarzyszącym ich produkcji (największym, spośród podstawowych materiałów budowlanych). Stropy, w których masa belek stalowych będzie jak najniższa (przy zachowaniu wymaganej nośności oraz wszystkich niezbędnych parametrów użytkowych), będą konstrukcją bardziej przyjazną dla środowiska niż analogiczne rozwiązania o większej masie stali konstrukcyjnej. Ważnym czynnikiem wspomagającym promowanie takich konstrukcji jest również aspekt ekonomiczny - koszt stalowej konstrukcji stropu jest wprost proporcjonalny do jej masy. A zatem konstrukcje lżejsze będą zarówno tańsze, jak i bardziej ekologiczne.

W niniejszej pracy (zgodnie z jej tematem) skupiono się na wpływie wyboru rodzaju stropów (w szkieletowych budynkach stalowych) na poziom oddziaływania na środowisko, analizując tylko ich konstrukcję pod kątem energochłonności wykonania oraz poziomu emisji CO₂. Chcąc jednak oszacować wpływ kompleksowej realizacji całego budynku na poziom oddziaływania na środowisko, należałoby przeprowadzić szczegółowe obliczenia, uwzględniające wszystkie materiały i procesy technologiczne związane z jego budową.

Przy ekologicznym podejściu do projektowania elementów konstrukcji budowlanych należy wybierać takie rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne, których produkcja, transport i montaż w sposób neutralny, ewentualnie jak najmniej szkodliwy, oddziałuje na środowisko naturalne. Jeżeli stosowanie takich materiałów lub technologii (z różnych względów) jest niemożliwe, należy wybierać rozwiązania materiałoszczędne - mniejsza masa konstrukcji oznacza mniejszą energochłonność produkcji i niższą emisję CO₂ do środowiska.

LITERATURA

- [1] Berge B., *The Ecology of Building Materials*, Oxford Architectural Press, 2001.
- [2] *Efektywność wykorzystania energii w latach 2004-2014 GUS*, Warszawa 2016, 59-60.
- [3] Gajdzik B., *Energochłonność produkcji stali - analiza retrospektywna*, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 4/2016, Gliwice 2016, tom 68, 34-41.
- [4] Kowalczyk R., *Konstrukcje zespolone w budynkach wysokich*, XI Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespolone, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2017.
- [5] Kucharczuk W., Labocha S., *Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe budynków*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2008.
- [6] Lubiński M., Żółtowski W., *Konstrukcje metalowe, cz. 2*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2008.
- [7] PN-EN 1993-1-1 EUROKOD 3. *Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne I reguły dla budynków*, Bruksela 2006.
- [8] PN-EN 1994-1-1 EUROKOD 4. *Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*, Bruksela 2008.
- [9] Szumilaga M., Pawłowski D., *Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych*, Przegląd Budowlany 2014, 3.

THE INFLUENCE OF THE CHOICE OF CEILING CONSTRUCTION ON THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL IMPACT

In this publication, the analysis of selected types of ceilings in terms of environmental impact was created. Two different design solutions were proposed for the considered assumptions. The mass of steel beams was determined for the variants under consideration. Carbon dioxide emission and energy intensity associated with the production process of the analyzed ceilings were calculated and compared.

Keywords: steel-concrete floors, energy intensity, CO₂ emission