

dr inż. Marcin Niedośpiał¹⁾

ORCID 0000-0001-9421-3856

prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera^{1)*}

ORCID 0000-0001-9084-2372

Possibilities and principles of shaping of composite slabs with profiled steel sheets

Możliwości i zasady kształtowania stropów zespolonych z blachami fałdowymi

DOI: 10.15199/33.2025.07.02

Summary: The possibilities of shaping composite slabs made using corrugated steel sheets are discussed. Technical problems encountered in the design and implementation of the structures of this type are particularly considered. Potential savings in labour costs as well as a possible reduction of CO₂ emissions are indicated as well in the case of choosing the solution of this kind. The significant importance of the metal-concrete shear connection selected for practical use is emphasized. The impact of individual solutions presented in the article both on the associated transport costs and on the construction efficiency is also assessed for comparative purposes. The fire resistance of composite floors is not addressed in this paper due to the comprehensiveness of the subject.

Keywords: composite structures; composite slabs with profiled steel sheeting; carbon footprint.

Streszczenie: Przedyskutowano możliwości kształtowania stropów zespolonych wykonywanych z użyciem stalowych blach fałdowych. Omówiono problemy techniczne występujące przy projektowaniu i realizacji tego typu konstrukcji. Wskazano potencjalne oszczędności w kosztach robocizny oraz możliwą redukcję emisji CO₂ w przypadku wyboru tego rodzaju rozwiązania. Podkreślono istotne znaczenie rodzaju zespolenia blachy z betonem wybranego do praktycznego stosowania. W celach porównawczych dokonano oceny wpływu poszczególnych rozwiązań prezentowanych w artykule, zarówno pod względem kosztów transportu, jak i efektywności budowy. W artykule nie podjęto tematu odporności ogniowej stropów zespolonych z powodu obszerności tego zagadnienia.

Słowa kluczowe: konstrukcje zespolone; stropy na blachach fałdowych; ślad węglowy.

One of the variant of the slab is to make it using a metal sheet with a suitable shape, such as trapezoidal. There are three possible solutions:

1) The profiled sheet serves solely as formwork and a working platform during slab construction, without contributing to the concrete slab's structural capacity.

2) The profiled sheet is the load-bearing element during both the installation and use phases, with the concrete slab functioning as non-structural infill.

3) The profiled sheet collaborates with the concrete slab, providing a working platform during construction while also serving as tensile reinforcement in the span during the service phase.

In the first solution, the profiled sheet does not contribute to the slab's load-bearing capacity during the service phase and that's why it can be relatively thin and as a result light, designed only to support installation loads. To further reduce its thickness or height, temporary supports can be employed during construction. The second solution requires a thicker and heavier profiled sheet, which increases costs, particularly for the spans typically found in cubic construction. The third solution is the most material-efficient, as the sheet metal is utilized in both the installation and service phases. The natural adhesion between the sheet metal and concrete is insufficient to transfer the shear forces at their interface.

Jednym z wariantów stropu jest wykonanie go z użyciem blachy o odpowiednim kształcie, np. trapezowej. Możliwe są trzy rozwiązania:

1) blacha fałdowa nie współpracuje z płytą betonową, lecz stanowi jedynie szalunek tracony oraz pomost roboczy podczas wykonywania płyty;

2) blacha fałdowa jest elementem nośnym zarówno w fazie montażu, jak i użytkowania, a płyta betonowa jest jej niekonstrukcyjnym wypełnieniem;

3) blacha fałdowa współpracuje z płytą betonową – stanowi pomost roboczy podczas etapu realizacji oraz pełni rolę zbrojenia rozciąganego w przeszle na etapie użytkowania.

W pierwszym rozwiązaniu, w sytuacji trwałej, nie uwzględnia się blachy fałdowej w nośności i dlatego może być ona stosunkowo cienka, a w efekcie lekka (ma za zadanie przenieść tylko obciążenia montażowe). W celu ograniczenia jej grubości (wysokości) można zastosować dodatkowe podparcia na czas montażu. Drugie rozwiązanie wymaga zastosowania dość grubych (wysokich) blach, co przy stosowanej rozpiętości stropów w budownictwie kubaturowym prowadzi do zwiększenia kosztów. Trzecie rozwiązanie jest optymalne pod względem materiałowym – blacha jest wykorzystywana zarówno w fazie montażu, jak i użytkowania. Naturalna przyczepność, która występuje na styku blachy i betonu, jest jednak niewystarczająca do przeniesienia sił ścinających (rozwarstwiających), powstających na styku tych dwóch materiałów.

W pierwszych rozwiązaniach z lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku, w Stanach Zjednoczonych [1, 2] stosowano spa-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

^{*)} Correspondence address: elzbieta.szmigiera@pw.edu.pl

Early solutions, developed in the 1960s in the United States [1, 2], involved welding longitudinal bars to the sheet metal (Figure 1a). While effective, this method was labor-intensive and costly. Modern standards [3] now recommend using sheets with specially shaped walls – such as embossments or indentations for mechanical interlocking (Figure 1b) – or a so-called “dovetail” profile for frictional interlocking, which induces pressure between the sheet and concrete (Figure 1c), to enhance adhesion and ensure effective load transfer.

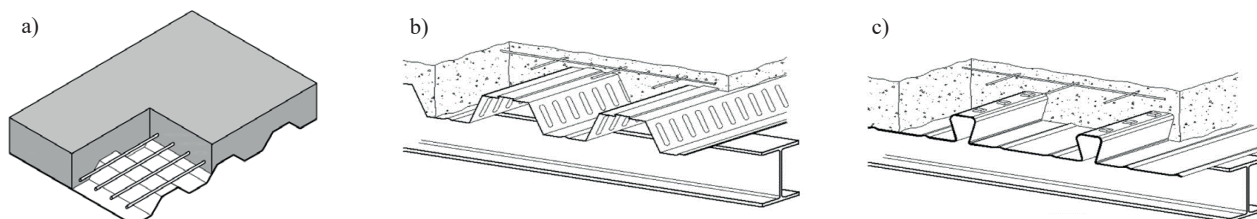


Fig. 1. Examples of a composite slabs with profiled steel sheet bonded: a) by welded bars; b) mechanical; c) frictional
Rys. 1. Przykłady stropów zespolonych z blachą faldową o zespoleniu: a) za pomocą spawanych prętów; b) mechanicznym; c) ciernym

The advantages of composite floors with profile sheets are primarily: the elimination of formwork for the slab, a reduction in its dead weight, ease of installation, and the ability to construct multiple floors simultaneously, which shortens construction time and reduces labor costs. Structurally, these slabs provide significant stiffness, protecting the integrity of steel beams by preventing stability loss and ensuring effective load transfer. However, notable drawbacks include the higher material cost of the slab, the need for a suspended ceiling or alternative fire protection measures to achieve the required fire resistance, and limitations related to span length and the unidirectional load-bearing nature of the slab. Compared to reinforced concrete slabs, designing composite slabs with profiled steel sheets requires a more detailed approach, particularly in accounting for installation conditions, which must be integrated into the design calculations. This article discusses selected challenges in the dimensioning of composite slabs with profiled steel sheets.

Calculation of the Composite Slabs with Profiled Steel Sheets

Designing composite slabs with profiled steel sheets involves additional considerations beyond those for reinforced concrete slabs. It requires verifying the slab's resistance and deflections during the construction phase (not just the service phase) and assessing longitudinal shear resistance, in addition to standard calculations such as resistance to bending, transverse shear, and punching shear. The dimensioning rules for composite slabs with profiled steel sheets are outlined in Section 9.7 of the standard [3], which distinguishes between two scenarios: full shear connection and partial shear connection.

Load Capacity of a Full Connection Section. For a section subjected to a positive moment, two cases must be considered: one where the plastic neutral axis lies above the profiled steel sheet (Figure 2a), and another where it is within the profiled

wanie prętów podłużnych do blachy (rysunek 1a). Rozwiązanie to było skuteczne, ale jednocześnie pracochłonne, a więc kosztowne. Obecnie w myśl postanowień normy [3], w celu uzyskania zespolenia stosuje się blachy o specjalnie ukształtowanych ściankach (wytlóczenia, karby – zespolenie mechaniczne, mające za zadanie zwiększyć przyczepność między blachą a betonem – rysunek 1b) lub o specjalnym kształcie (kształt wklęsły, tzw. jaskółczy ogon – zespolenie ciernie ma za zadanie wywołanie docisku między blachą a betonem – rysunek 1c).

Zalety stropów zespolonych z blachami faldowymi to przede wszystkim: brak szalunków płyty stropowej i zmniejszenie jej ciężaru własnego; łatwość montażu; możliwość jednoczesnego wykonywania kilku kondygnacji, co w konsekwencji prowadzi do skrócenia czasu budowy i ograniczenia kosztów robocizny. Ważną zaletą konstrukcyjną jest duża sztywność stropu – zabezpiecza on belki stalowe przed utratą stateczności, tworząc tarczę, przenoszącą obciążenia poziome. Do głównych wad można zaliczyć: duże koszty materiałowe, konieczność wykonania sufitu podwieszonego bądź innych zabezpieczeń ogniochronnych w celu uzyskania wymaganej odporności ogniowej elementu oraz ograniczenia związane z rozpiętością i jednokierunkowym charakterem pracy stropu. W porównaniu ze stropami żelbetowymi, projektowanie stropów zespolonych wymaga także większego nakładu pracy – podczas obliczeń należy uwzględnić sytuację montażową. W artykule omówiono wybrane zagadnienia dotyczące wymiarowania stropów zespolonych z blachą faldową.

Obliczanie stropów zespolonych

Specyfiką projektowania stropów zespolonych z blachą faldową jest konieczność sprawdzenia ich nośności i ugięcia także w sytuacji montażowej (nie tylko w sytuacji trwałej) oraz nośności na ścinanie podłużne (oprócz standardowych obliczeń, jak w przypadku płyty żelbetowej, czyli nośności na zginanie, ścinanie poprzeczne i przebicie).

Zasady wymiarowania stropów zespolonych z blachą faldową zostały omówione w rozdziale 9.7 normy [3]. Rozróżniono dwie sytuacje – nośność przekroju w pełni zespolonego i nośność przekroju o niepełnym zespoleniu.

Nośność przekroju w pełni zespolonego. W przypadku przekroju obciążonego momentem dodatnim rozróżnić należy dwa przypadki – pierwszy, gdy plastyczna oś obojętna leży powyżej profilu blachy (rysunek 2a) i drugi, gdy plastyczna oś obojętna zlokalizowana jest w blaszce (rysunek 2b). W pierw-

steel sheet (Figure 2b). In the first case, it may be necessary to account for the resultant force from additional longitudinal reinforcement located in the rib of the profiled steel sheet.

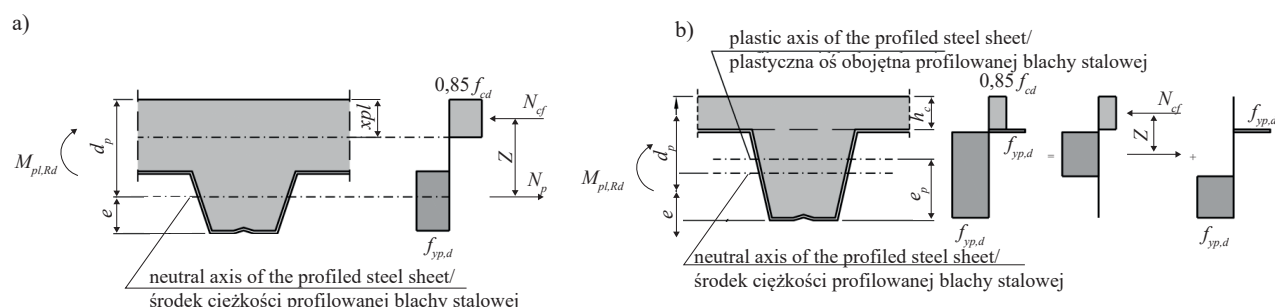


Fig. 2. Stress distribution under a positive bending moment: a) neutral axis above the profiled steel sheet, without additional reinforcement in the rib; b) neutral axis within the profiled steel sheet

Rys. 2. Rozkład naprężeń w przypadku dodatniego momentu zginającego: a) oś obojętna ponad profilem blachy, bez dodatkowego zbrojenia w fałdzie; b) oś obojętna w profilu blachy

The calculation of the resistance of a fully composite section can be conducted in a manner analogous to that of a reinforced concrete section. This involves the utilization of the equilibrium equations of the flexural section. A set of equations for the calculation of the resistance for different positions of the neutral axis is given in [4]. However, the calculation becomes slightly more complicated when the neutral axis is located in the profiled steel sheet and additional reinforcement is applied in the rib. This issue was addressed by utilising spreadsheet no 1, which is included in [4]. This spreadsheet employs numerical iterative methods to analyze composite sections. The spreadsheet is a valuable aid, facilitating the design of this type of floor.

When calculating the section resistance under negative moment, the position of the neutral axis and its resistance are calculated in the same way as for positive moment, but the profiled steel sheet is excluded. Two cases of neutral axis position must be distinguished: in the profile (Figure 3a) and above the profiled steel sheet profile (Figure 3b). The formulae for calculating the section resistance are given in [4].

Load Capacity of a Partially Connected Section. The case of a partial full shear connection occurs when the limit stresses are not reached in the profiled steel sheet due to insufficient anchorage distance. Failure of the section will then not occur as a result of plasticization of the profiled steel sheet, but as a result of loss of adhesion between the profiled steel sheet and the concrete. This phenomenon is closely related to bending,

szym przypadku może zaistnieć konieczność uwzględnienia wypadkowej od dodatkowego zbrojenia podłużnego, umieszczonego w fałdzie blachy.

Obliczenie nośności przekroju w pełni zespolonego można wykonać analogicznie jak w przypadku przekroju żelbetowego, korzystając z równań równowagi przekroju zginanego. Komplet wzorów do obliczania nośności stropów w przypadku różnych wariantów położenia osi obojętnej zamieszczono w [4]. Obliczenia nieco komplikują się, gdy oś obojętna znajduje się w blasze i zastosowano dodatkowe zbrojenie w fałdzie. Problem ten rozwiązano przy użyciu arkusza kalkulacyjnego nr 1 dołączonego do [4]. Zastosowano w nim analizę przekroju zespolonego, wykorzystując numeryczne metody iteracyjne. Arkusz kalkulacyjny stanowi cenną pomoc, ułatwiając projektowanie tego typu stropów.

Obliczając nośność przekroju pod działaniem momentu ujemnego, położenie osi obojętnej i jego nośność oblicza się analogicznie jak w przypadku momentu dodatniego, ale pomija się blachę poszycia. Rozróżnia się dwa przypadki położenia osi obojętnej: w profilu (rysunek 3a) i ponad profilem blachy (rysunek 3b). Wzory do obliczenia nośności przekroju zamieszczono w [4].

Nośność przekroju częściowo zespolonego. Przypadek niepełnego zespolenia zachodzi, gdy w blasze poszycia nie wystąpią naprężenia graniczne ze względu na zbyt krótki odcinek jej zakotwienia. Do zniszczenia przekroju dojdzie wówczas na skutek utraty przyczepności między blachą a betonem, a nie uplastycznienia się blachy. Zjawisko to jest związane ze zginaniem, które wywołuje styczne naprężenia rozwarstwiające, dążące do oddzielenia betonu i blachy fałdowej.

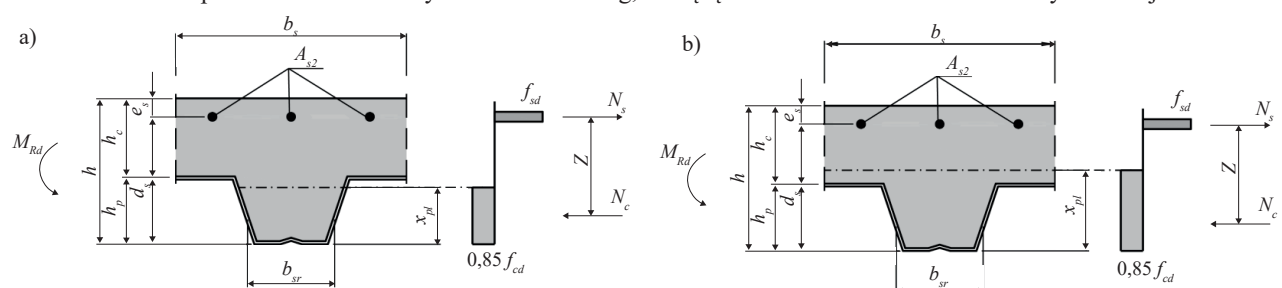


Fig. 3. Stress distribution for negative bending moment: a) neutral axis within the profiled steel sheet; b) neutral axis above the profiled steel sheet

Rys. 3. Rozkład naprężeń w przypadku ujemnego momentu zginającego: a) oś obojętna w profilu blachy; b) oś obojętna ponad profilem blachy

which induces longitudinal shear stresses that tend to separate the concrete and the profiled steel sheet.

According to the recommendations of the standard [3], the design longitudinal shear resistance can be determined using the $m - k$ method or the partial connection method.

In the $m - k$ method, it must be shown that the maximum value of the design shear force V_{Ed} over the width of the slab b is not greater than the design shear resistance of the slab, as determined by the formula in [3]. This method was not mentioned in the proposal for a new version of the standard [5]. In the partial connection method, which can only be used for composite slabs that behave in a ductile manner during shear, the shear resistance at the interface between the profile sheet and the concrete is taken into account in the calculations. This assumes that the adhesion stress $\tau_{u,Rd}$ (a value specified and given by the profiled steel sheet manufacturer) is constant along the length of the beam. Then the longitudinal shear resistance in the section at distance L_x from the nearest support, is given by the formula:

$$N_c = \int_0^{L_x} \tau_{u,Rd} b dx = \tau_{u,Rd} b L_x \leq N_{c,f} \quad (1)$$

where:

$\tau_{u,Rd}$ – the design longitudinal shear strength,

L_x – the distance between the cross-section under consideration and the nearest support,

b – the width under consideration

$N_{c,f}$ – the limiting force in the compressed zone of the concrete, determined excluding any reinforcement.

From the formula (1) it is possible to determine the minimum distance $L_{x,pl}$ that is necessary to achieve full connection. Table shows the values of the minimum distances $L_{x,pl}$, needed to achieve full connection, for selected profiled steel sheets used in Poland. The span of the decking (and thus the span of the floor slab) at which a section can be considered fully connected varies from 2.8 m (Cofrastra 40, 0.75 mm thick) to theoretically as much as 20.76 m (Cofraplus 77, 1.0 mm thick).

Minimum length $L_{x,pl}$ needed to achieve full shear connection for selected profiled steel sheets in single-span simply supported slabs [4]

The section resistance considering longitudinal shear may be checked using the formulae given in Section 6.3.2 [3], with modifications to replace the resultant force in the compressed zone $N_{c,f}$ (for full connection) by N_c (for partial connection) or by assuming, in simplification, that along the length $L_{x,pl}$ there is a linear increase in resistance

Minimum length $L_{x,pl}$ needed to achieve full shear connection for selected profiled steel sheets in single-span simply supported slabs [4]

Minimalna długość $L_{x,pl}$ potrzebna do osiągnięcia pełnego zespolenia wybranych blach w jednoprzęsłowych płytach swobodnie podpartych [4]

Profiled steel sheet/ Typ blachy	Thickness/ Grubość blachy [mm]	$\tau_{u,Rd}$ [MPa]	$L_{x,pl}$ [m]	$2L_{x,pl}$ [m]
Cofraplus 60	0,75/0,88/1,00/1,25	0,10	3,60/4,26/4,87/6,15	7,2/8,52/9,74/12,3
Cofraplus 77	0,75/0,88/1,00	0,05	7,65/9,07/10,38	15,3/18,14/20,76
Cofrastra 40	0,75/0,88/1,00	0,30	1,40/1,64/1,88	2,8/3,28/3,76
Cofrastra 70	0,75/0,88/1,00	0,10	2,32/2,76/3,15	4,64/5,52/6,3

Zgodnie z zalecaniami normy [3], obliczeniową nośność na ścinanie podłużne można określić za pomocą metody $m - k$ lub metody częściowego zespolenia. W metodzie $m - k$ należy wykazać, że maksymalna wartość obliczeniowej siły ścinającej V_{Ed} na szerokości płyty b nie jest większa od obliczeniowej nośności płyty na ścinanie, określonej wzorem wg [3]. Metoda ta nie została przywołana w propozycji nowej wersji normy [5]. W metodzie częściowego zespolenia, którą można stosować tylko w przypadku płyt zespolonych, które podczas ścinania zachowują się w sposób ciągły, uwzględnia się wytrzymałość na ścinanie na styku blachy profilowej i betonu. Zakłada się, że naprężenia przyczepności $\tau_{u,Rd}$ (wartość określona i podana przez producenta blachy) są stałe na długości belki. Wówczas nośność na ścinanie podłużne w przekroju w odległości L_x od najbliższej podpory, określa się wzorem:

$$N_c = \int_0^{L_x} \tau_{u,Rd} b dx = \tau_{u,Rd} b L_x \leq N_{c,f} \quad (1)$$

gdzie:

$\tau_{u,Rd}$ – obliczeniowa wartość wytrzymałości na ścinanie podłużne;

L_x – odległość między rozpatrywanym przekrojem poprzecznym a najbliższą podporą;

b – rozpatrywana szerokość;

$N_{c,f}$ – graniczna siła w strefie ściskanej betonu, wyznaczona z pominięciem ewentualnego zbrojenia.

Z wzoru (1) można określić minimalną odległość $L_{x,pl}$, jaka jest niezbędna do uzyskania pełnego zespolenia. W tabeli zamieszczono wartości minimalnej odległości $L_{x,pl}$, potrzebnej do osiągnięcia pełnego zespolenia, w przypadku wybranych blach stosowanych w Polsce. Rozpiętość blachy (a tym samym i przęsła płyty stropowej), przy której można uznać przekrój za w pełni zespolony, wynosi od 2,8 m (blacha Cofrastra 40, grubości 0,75 mm) do teoretycznie nawet 20,76 m (blacha Cofraplus 77, grubości 1,0 mm).

Nośność przekroju z uwzględnieniem ścinania podłużnego można sprawdzać, korzystając ze wzorów zamieszczonych w rozdziale 6.3.2 normy [3], zastępując wypadkową siłę w strefie ściskanej $N_{c,f}$ (przy pełnym zespoleniu) przez N_c (przy częściowym zespoleniu) lub przyjmując w uproszczeniu, że na długości $L_{x,pl}$ następuje liniowy przyrost nośności od

wartości $M_{pl,a,Rd}$ (nośność na zginanie samej blachy) do wartości $M_{pl,Rd}$ (nośność na zginanie przekroju w pełni zespolonego). W przykładzie zamieszczonym w [4], największe różnice między nośnościami wyznaczoną tymi dwoma sposobami dochodziły do 8%, przy czym druga z metod (bazująca na liniowym przyroście nośności) była bardziej konserwatywna.

from $M_{pl,a,Rd}$ (flexural resistance of the profiled steel sheet) to $M_{pl,Rd}$ (flexural resistance of the fully connected section). In the example given in [4], the largest differences between the resistance determined by the two methods reached 8%, with the second method (based on a linear increase in resistance) being more conservative.

Factors for choosing a composite slabs with profiled steel sheet

Investors or designers rarely choose the composite slabs with profiled steel sheet as the first structural solution. This may be influenced by the low popularity of this type of solution in Poland and designers' concerns about the specifics of designing less frequently used structures and getting used to well-known solutions. The use of a composite slab with profiled steel sheet rather than a reinforced concrete slab, may involve some design or implementation problems.. First of all, such a slab works as a unidirectional slab, which in turn necessitates the use of beams or other supports to achieve just such a static scheme. In addition, if a profiled steel sheet is adopted which is not adapted to the span of the slab (table), it may turn out that at no point is a fully connection section obtained, which may lead to an uneconomical slab design.

According to standard [3], a composite slabs can be dimensioned as a series of single-span simply supported slabs. In this case, the cross-sectional area of the reinforcement placed over the supports and counteracting the cracking should be no less than 0.2% of the concrete cross-sectional area over the folds for a structure that has not been assembly-supported and 0.4% otherwise. The reinforcement calculated in this way will generally be less than the reinforcement required due to the bending moment occurring above the support, in the case of a slab calculated as continuous. It is then assumed that some redistribution of the bending moment may occur. At the same time, the profiled steel sheet used for a single-span simply supported slab scheme may need to be thicker than for a continuous slab scheme.

In selecting an appropriate profiled steel sheet, it is imperative to consider not only its mechanical characteristics but also the type of connection (i.e. the shape of the profiled steel sheet). Profiled steel sheets with a friction connection (Figure 1c) present significant limitations in terms of transport efficiency when compared to those with a mechanical connection (Figure 1c). The former's shape results in increased spatial requirements, which can lead to an increase in the number of transport trips and, consequently, elevated costs and CO₂ emissions.

At the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology, analyses are conducted to evaluate the efficiency of the described slabs compared to reinforced concrete slabs. In [6], a technical and cost comparison is presented for the floor of a hospital building constructed using different technologies. Three types of construction for the same slab were evaluated: a reinforced concrete slab supported by reinforced concrete beams, arranged in either one or two directions, and a composite slab with profiled steel sheets and steel beams. In the solutions analyzed, we found that the cost distribution for labor (R), materials (M), and equipment (S) in reinforced concrete slabs was nearly identical (Figure 4). However, for the

Czynniki decydujące o wyborze stropu zespolonego z blachą fałdową

Inwestorzy lub projektanci rzadko wybierają stropy zespolone z blachą fałdową jako pierwsze rozwiązanie konstrukcyjne. Może na to wpływać mała popularność w Polsce tego typu rozwiązań, obawy projektantów związane ze specyfiką projektowania rzadziej stosowanych konstrukcji oraz przyzwyczajenie do powszechnie znanych rozwiązań.

Zastosowanie stropu zespolonego z blachą fałdową, zamiast stropu żelbetowego, może wiązać się z pewnymi problemami projektowymi lub wykonawczymi. Przede wszystkim schematem statycznym takiego stropu jest płyta jednokierunkowa, co z kolei wymusza zastosowanie belek lub innych podpór, umożliwiających uzyskanie takiego schematu. Ponadto, w przypadku przyjęcia blachy niedostosowanej do rozpiętości płyty (tabela), może się okazać, że w żadnym miejscu nie uzyskuje się przekroju w pełni zespolonego, co prowadzi do nieekonomicznego zaprojektowania stropu. Zgodnie z normą [3], stropy zespolone można wymiarować jako szereg płyt jednoprzęsłowych swobodnie podpartych. Wówczas pole przekroju zbrojenia umieszczonego nad podporami i przeciwdziałającego zarysowaniu powinno być nie mniejsze niż 0,2% przekroju poprzecznego betonu ponad fałdami konstrukcji, która nie była podparta montażowo i 0,4% w przeciwnym przypadku. Tak obliczone zbrojenie z reguły będzie mniejsze od zbrojenia wymaganego ze względu na moment zginający występujący nad podporą, w przypadku płyty obliczonej jako ciągła. Zakłada się wówczas, że może dojść do pewnej redystrybucji momentu zginającego. Jednocześnie może się okazać, że blacha zastosowana przy schemacie płyty jednoprzęsłowej swobodnie podpartej będzie musiała być grubsza niż w przypadku schematu płyty ciągłej.

Kierując się doбором odpowiedniej blachy, należy zwrócić uwagę nie tylko na jej właściwości mechaniczne, ale także na rodzaj zespolenia (kształt blachy). Blachy o zespoleniu ciernym (rysunek 1c), w porównaniu z blachami o zespoleniu mechanicznym (rysunek 1b), ze względu na swój kształt, zajmują więcej miejsca, co przekładać się może na konieczność wykonania większej liczby kursów transportowych, a w efekcie większe koszty oraz emisję CO₂.

Na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej prowadzone są analizy efektywności stosowania opisywanych stropów, w odniesieniu do stropów żelbetowych. W [6] porównano aspekty techniczno-kosztowe stropu budynku szpitala wykonanego w różnych technologiach. Rozważaniu poddano trzy rodzaje konstrukcji tego samego stropu: żelbetowy oparty na belkach żelbetowych, rozmieszczonych w jednym bądź w dwóch kierunkach, oraz strop zespolony z blachą fałdową i z belkami stalowymi. W analizowanych rozwiązaniach okazało się, że rozkład kosztów pomiędzy robocizną (R), materiałem (M) i sprzętem (S) w przypadku stropów żelbetowych był niemal identyczny (rysunek 4). Natomiast w przypadku stropu zespolonego dało się zauważyć, że udział kosztów robocizny i sprzętu w całkowitym koszcie wykonania stropu był zauważalnie mniejszy, przy czym całkowity koszt stropu zespolonego okazał się nieco większy (o ok. 7%) niż stropów żelbetowych.

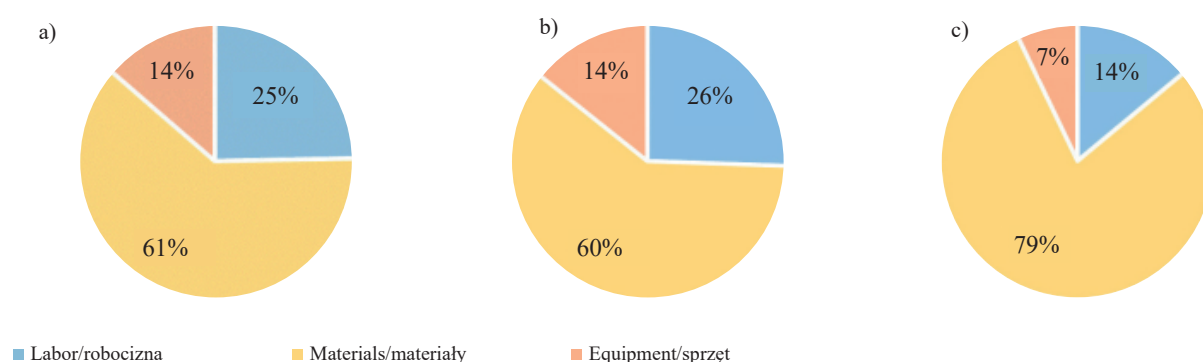


Fig. 4. The share of labor, materials and equipment in the total construction cost of: a) a one-way beam floor; b) a two-way beam floor; c) a composite slab with profiled steel sheet

Rys. 4. Udział robocizny, materiałów i sprzętu w całkowitym koszcie wykonania: a) strop belkowy jednokierunkowy; b) strop belkowy dwukierunkowy; c) strop zespolony z blachą fałdową

composite slab, the share of labor and equipment costs in the total cost was significantly lower, although the overall cost of the composite slab was slightly higher (by approximately 7%) than that of the reinforced concrete slab.

The use of profiled steel sheet as permanent formwork eliminates the costs associated with the assembly and disassembly of traditional formwork. In addition, the ability to work on multiple storeys simultaneously, thanks to the working platform provided by the profiled steel sheet, further speeds up the construction schedule. The long-term savings associated with faster construction make composite slabs a cost-effective solution. In addition, the reduced dead weight of composite slabs with profiled steel sheets, compared to solid slabs, can also lead to savings in the cost of the building's foundations and supporting structure of the building (particularly in tall and high-rise buildings). Given the ever-increasing cost of labour, it may be that a composite slab, being quicker and less labour-intensive to construct, can be less expensive alternative to reinforced concrete slabs. This is particularly justified in steel-framed multi-storey buildings, in projects with tight schedules and in situations where structural weight reduction is important.

The advantages of composite slab with profiled steel sheet are often exploited in the retrofitting and conversion of old buildings [7, 8], including historic buildings.

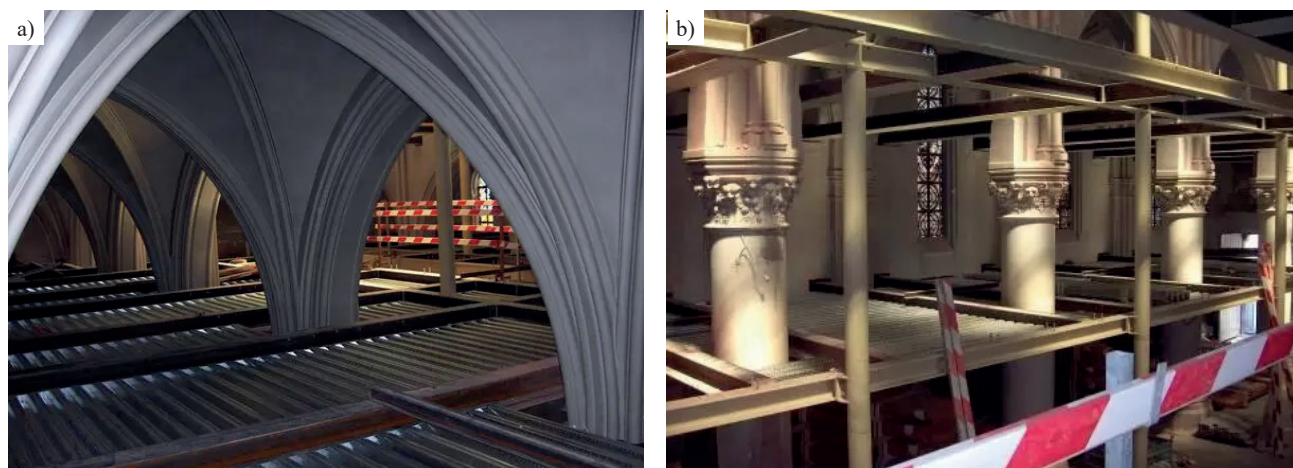
An interesting example is the renovation and conversion of a 19th century church in Mechelen, Belgium, into the four star, 77-room Martin's Patershof Hotel within the existing structure. For the first time, the renovation and modernisation used composite slab with profiled steel sheet with a lightweight concrete slab (photography).

The choice of this floor solution was due to several critical structural and construction reasons. Firstly, the site conditions required all materials to be moved manually through the access gate, which was only 1.4 m wide. Next, the thickness of the slab had to be 23 cm, which made it possible, using lightweight concrete, to achieve an allowable dead weight of 1.5 kN/m². In order to avoid additional intermediate supports, the slab had to have sufficient stiffness with a small thickness and low dead weight. The composite slab with profiled steel sheet used, with lightweight concrete also proved its worth

Wykorzystanie blachy fałdowej jako szalunku traconego eliminuje koszty związane z montażem i demontażem deskowania tradycyjnego. Ponadto, możliwość prowadzenia prac na wielu kondygnacjach jednocześnie dzięki platformie roboczej, jaką stanowi blacha, dodatkowo przyspiesza harmonogram budowy. Długoterminowe oszczędności związane z szybszą budową sprawiają, że stropy zespolone mogą być opłacalnym rozwiązaniem. Ponadto mniejszy ciężar własny stropów zespolonych z blachami fałdowymi, w porównaniu ze stropami pełnymi, może prowadzić do oszczędności kosztów fundamentów i konstrukcji nośnej budynku (szczególnie budynków wysokich i wysokościowych). Uwzględniając stale zwiększający się koszt robocizny, może okazać się, że strop zespolony, jako mniej pracochłonny w wykonaniu, może być tańszą alternatywą dla stropu żelbetowego. Szczególnie jest to uzasadnione w budynkach wielokondygnacyjnych o konstrukcji stalowej oraz w sytuacjach, gdzie istotna jest redukcja ciężaru konstrukcji lub czasu wykonania obiektu.

Zalety stropów na blachach fałdowych są często wykorzystywane przy modernizacji i przebudowie starych budynków [7, 8], w tym obiektów historycznych. Jednym z interesujących przykładów jest renowacja i przekształcenie dziewiętnastowiecznego kościoła w Mechelen w Belgii w czterogwiazdkowy Martin's Patershof Hotel, z siedemdziesięcioma siedmioma pokojami w obrębie istniejącej konstrukcji. Po raz pierwszy przy renowacji i modernizacji zastosowano stropy zespolone na blachach fałdowych z płytą wykonaną z betonu lekkiego (fotografia).

Wybór tego rozwiązania stropu wynikał z kilku bardzo istotnych powodów konstrukcyjno-wykonawczych. Po pierwsze, warunki placu budowy wymagały ręcznego przenoszenia wszystkich materiałów przez bramę wjazdową, która miała zaledwie 1,4 m szerokości. Ponadto grubość płyty powinna wynosić 23 cm, co przy zastosowaniu betonu lekkiego pozwoliło uzyskać dopuszczalny ciężar własny 1,5 kN/m². W celu uniknięcia dodatkowych podpór pośrednich, strop powinien mieć odpowiednią sztywność przy niewielkiej grubości i małym ciężarze własnym. Zastosowany strop zespolony na blachach fałdowych z betonem lekkim sprawdził się też z powodu niewielkiej nośności gruntu pod modernizowanym obiektem.



Martin's Patershof Hotel – assembly of composite slabs made of lightweight concrete with profiled steel sheets [8]
Martin's Patershof Hotel – montaż stropów zespolonych na blachach fałdowych z betonem lekkim [8]

because of the poor bearing capacity of the soil beneath the building being modernised.

In the context of sustainability, the magnitude of CO₂ emissions is an important issue. A composite slab construction may have a lower carbon footprint compared to, for example, a slab-and-beam slab construction, as shown in Figure 5. This is mainly due to the smaller amount of concrete used in the construction of the floor. Only phases A1 – A3 were analysed, covering the processes involved in sourcing the raw materials, transporting them and producing the construction products. The profiled steel sheet used for the floor can be recycled at the building demolition stage, which can also significantly reduce the carbon footprint. Of course, the methodology for calculating the carbon footprint can vary and the results obtained, depending on the level of detail of the calculation adopted, may differ [9].

W kontekście zrównoważonego rozwoju istotną kwestią jest wielkość emisji CO₂. Konstrukcja stropu zespolonego może charakteryzować się mniejszym śladem węglowym w porównaniu z konstrukcją stropu płytowo-belkowego, co pokazano na rysunku 5. Wynika to przede wszystkim z mniejszej ilości betonu użytego do wykonania stropu. Przeanalizowano fazy A1-A3, obejmujące procesy związane z pozyskiwaniem surowców, ich transportem i produkcją wyrobów budowlanych. Blacha użyta do wykonania stropu może być poddana recyklingowi na etapie rozbiórki budynku, co w istotny sposób może zmniejszyć ślad węglowy. Metodologia obliczania śladu węglowego może być różna, a otrzymane wyniki, w zależności od przyjętego stopnia szczegółowości obliczeń, mogą się różnić [9].

Summary and conclusions

Composite slabs with profiled steel sheets are the modern and efficient construction solution often used in many European countries. Their modernity stems from the ability to incorporate innovative materials, such as advanced steel grades, lightweight concrete, or fiber-reinforced concrete. This adaptability allows the characteristics and parameters of the composite floor to be adjusted to the client's needs and the project's requirements. Composite slabs are characterized by rapid installation, reduced dead weight, and the elimination of traditional formwork, leading to economic benefits and a faster construction process. They are widely utilized across a diverse range of building types, including newly constructed, modernized, and historic

Podsumowanie i wnioski

Stropy zespolone z blachami fałdowymi stanowią nowoczesne i efektywne rozwiązanie konstrukcyjne, często stosowane w wielu krajach europejskich. Wynika to także z faktu, że można modyfikować rozwiązanie, wykorzystując innowacyjne materiały: nowe gatunki stali, beton lekki lub fibrobeton. Oznacza to, że cechy i parametry stropu zespolonego można dostosowywać w dużym zakresie do potrzeb inwestora i wymagań projektu. Stropy na blachach fałdowych charakteryzują się łatwością montażu, redukcją ciężaru własnego, a także umożliwiają eliminację tradycyjnego szalunku, co przekłada się na korzyści ekonomiczne i przyspieszenie procesu budowlanego. Znajdują szerokie zastosowanie w różnych typach budynków, zarówno nowo wznoszonych, jak i modernizowanych i zabudkowych. Inwestor, decydując się

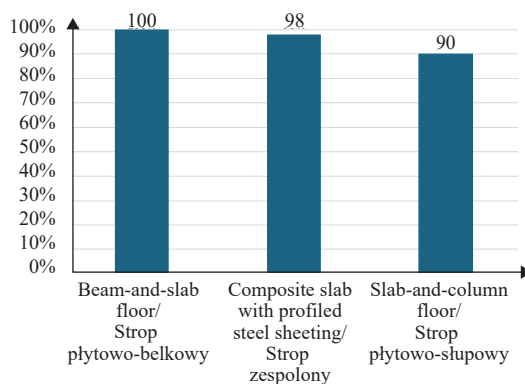


Fig. 5. Comparison of the input embedded carbon footprint (phases A1-A3) for different floor structures in a selected building [10]

Rys. 5. Porównanie wejściowego, wbudowanego śladu węglowego (fazy A1-A3) w przypadku różnych konstrukcji stropu w wybranym budynku [10]

structures. By opting for such a slab, the investor can anticipate a reduction in construction time, which translates into potential profits through earlier commercial availability of the building. The reduced weight of the floor results in material savings for other structural elements, such as beams, columns, and foundations. However, designing a composite slab with profiled steel sheets requires the designer to undertake a more detailed analysis, as it involves verifying not only the service phase but also the construction phase, along with the longitudinal shear resistance. In terms of sustainability, the potential to reduce the carbon footprint is noteworthy, making composite slabs an appealing choice for modern construction.

This paper was co-financed under the research grant of the Warsaw University of Technology supporting the scientific activity in the discipline of Civil Engineering, Geodesy and Transport.

Received: 14.02.2025

Revised: 17.03.2025

Published: 23.07.2025

na wybór takiego stropu, może liczyć na skrócenie czasu budowy, co z kolei przekładać się może na potencjalny zysk z wcześniejszej dostępności komercyjnej obiektu.

Redukcja ciężaru stropu prowadzi do oszczędności materiałowych w innych elementach konstrukcyjnych, takich jak belki, słupy czy fundamenty. Z kolei projektant, projektując strop zespolony z blachą fałdową, musi liczyć się z większym nakładem pracy ze względu na konieczność sprawdzenia nie tylko sytuacji trwałej, ale także montażowej oraz nośności na ścinanie podłużne. W kontekście zrównoważonego rozwoju zwrócić należy uwagę na możliwość redukcji śladu węglowego, co może być jednym z argumentów przemawiającym za ich wykorzystaniem w nowoczesnym budownictwie.

Niniejsza publikacja była finansowana w ramach grantu badawczego Politechniki Warszawskiej wspierającego prowadzenie działalności naukowej w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.02.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 17.03.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Granco Floor/Roof Construction, Catalog No. 99–1, Revised January 1969.
- [2] Granco Cofar Floor/Roof Systems, Catalog No. 99–14, January 1975.
- [3] PN-EN 1994-1-1:2008 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [4] Szmigiera E, Niedosiał M, Grzeszykowski B. Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych; Wydawnictwo Naukowe PWN; 2019.
- [5] N 2189 SC4.T6 Project Team final draft prEN 1994–1-1 General rules and rules for buildings.
- [6] Schulz J, Niedosiał ML. Analiza techniczno-ekonomiczna wybranych rozwiązań konstrukcyjnych stropu budynku szpitala; Przegląd Budowlany. 2024; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.8877>.
- [7] <https://constructalia.arcelormittal.com/pl/projekty/niemcy/zyylinderhaus;2025-04-12>.
- [8] https://constructalia.arcelormittal.com/en/news_center/articles/composite-flooring-solution-for-patershof-hotel;2025-04-12.
- [9] Załęgowski K, Jackiewicz-Rek W, Garbacz A, Courard L. Ślad węglowy betonu, Materiały Budowlane; 2013 (12): 34–36.
- [10] Nowak K. Analiza techniczno-ekonomiczna różnych wariantów projektu płyty stropowej budynku mieszkalnego wielorodzinnego wraz z porównaniem zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, praca magisterska, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, 2024.