

dr inż. Grzegorz Sadowski<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6441-0875

dr inż. Piotr Wiliński<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0002-8599-5099

prof. dr hab. inż. Anna Halicka<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0001-5526-8862

# Changes in methods for calculation of shear stress resistance at the interface between concretes cast at different times

*Zmiany w metodach obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia betonów układanych w różnych terminach*

DOI: 10.15199/33.2025.11.04

**Abstract.** The article analyses the changes in methods for the design shear stress resistance at the interface introduced in *fib* Model Code 2020 and EN-1992-1-1:2023, compared to *fib* Model Code 2010 and PN-EN-1992-1-1:2008. An analysis of calculation examples was conducted in accordance with the discussed procedures, highlighting both similarities and differences arising from the varying approaches in the respective methods. The most significant differences were observed in calculations according to the EN-1992-1-1:2023 standard compared to the other procedures discussed.

**Keywords:** bearing capacity of interface; indented interface; *fib* Model Code 2020, EN 1992-1-1:2023.

**Streszczenie.** W artykule przeanalizowano zmiany w metodach obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia dwóch betonów, wprowadzone w *fib* Model Code 2020 i normie EN-1992-1-1:2023, w porównaniu z *fib* Model Code 2010 i normą PN-EN-1992-1-1:2008. Przedstawiono przykłady obliczeń zgodnie z omawianymi procedurami, wskazując podobieństwa, i różnice wynikające z odmiennych podejść w poszczególnych metodach. Największe różnice były w obliczeniach zgodnie z normą EN 1992-1-1:2023 w porównaniu z pozostałymi opisywanymi procedurami.

**Słowa kluczowe:** nośność styku; powierzchnia styku z wrębami; *fib* Model Code 2020; EN 1992-1-1:2023.

Conscious design of structures, considering the shear resistance at the interface between concrete layers cast at different times, allows for the optimal use of the properties of the materials in such a solution. One of the first models related to the shear stress resistance at the reinforced interface can be found in the work [1] from 1966. The authors focused on the *shear-friction* phenomenon, which assumes that the shear stress resistance of the reinforced „concrete-to-concrete” interface is related to the simultaneous action of shear and compression. In 1972, a calculation was presented that accounted for the contribution of adhesion [2], and in 1978, the influence of the strength of the connected concretes was indicated [3]. Furthermore, from 1987 [4], the shear strength at the interface in the initial stages of cracking was described as a nonlinear function. In 1997, the expression defining the shear stress resistance at the interface was expanded by making the influence of adhesion dependent on the compressive strength of the concrete and the contribution of aggregate interlock, which is related to friction and the normal stress directed to the interface surface [5]. Additionally, the author [5] considered the influence of dowel action in the interface reinforcement and introduced the dependence of coefficients related to adhesion and interface roughness on the characteristics of the precast surface. The proposed model was

świadome projektowanie konstrukcji z uwzględnieniem nośności styku między warstwami betonu układanego w różnym czasie pozwala na optymalne wykorzystanie właściwości materiałów składowych takiego rozwiązania. Jeden z pierwszych modeli związanych z nośnością styku zbrojonego można odnaleźć w [1] z 1966 r. Autorzy skupili się na zjawisku *shear-friction*, które zakłada, że nośność na ścinanie styku „beton-beton” ze zbrojeniem zszywającym związana jest z jednoczesnym działaniem ścinania i ściskania. W 1972 r. zaprezentowano obliczenie, uwzględniające udział adhezji [2], a w 1978 r. wskazano na wpływ wytrzymałości łączonych betonów [3], zaś w [4] z 1987 r. opisano wytrzymałość styku na ścinanie w początkowych fazach pęknięcia w postaci funkcji nieliniowej. W 1997 r. rozbudowano wyrażenie określające nośność styku, uzależniając wpływ adhezji od wytrzymałości betonu na ściskanie oraz udziału wzajemnego zazębienia kruszywa, które jest związane z tarciem i naprężeniem normalnym skierowanym do powierzchni styku [5]. Dodatkowo w [5] uwzględniono wpływ działania trzpieniowego w zbrojeniu zszywającym (*dowel action*) oraz wprowadzono zależność współczynników związanych z adhezją i szorstkością styku od charakterystyki powierzchni prefabrykatu. Zaproponowany model częściowo został wprowadzony w normach PN-B-03264:2002 [6] oraz PN-EN 1992-1-1:2008 [7] (EC2-1-1:2008). Model w zmodyfikowanej wersji znalazł się też w *fib* Model Code 2010 [8] (MC2010). Stan wiedzy aktualny w 2025 r. odzwierciedlony jest w *fib* Model Code 2020 [9] (MC2020) oraz najnowszej edy-

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii

<sup>2)</sup> Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

\*) Correspondence address: grzegorz.sadowski@pw.edu.pl

partially incorporated into the standard PN-B-03264:2002 [6] and PN-EN 1992-1-1:2008 [7] (EC2-1-1:2008). The model, in a modified version, was also included in the *fib* Model Code 2010 [8] (MC2010). The current state of knowledge in 2025 is reflected in the *fib* Model Code 2020 [9] (MC2020) and the latest edition of the standard EN 1992-1-1:2023 [10], adopted in 2024 into the set of Polish Standards as PN-EN 1992-1-1:2024-05 [11] (EC2-1-1:2023).

Normative models used for calculating the shear stress resistance at the interface are based on assumptions of the interaction of friction forces, adhesion, mechanical interlocking, and dowel action at the interface reinforcement. Depending on the adopted calculation procedure, the individual components of the shear stress resistance at the interface may differ. In scientific research, it has often been indicated that it is impossible to fully utilize the shear stress resistance provided by the reinforcement at the interface, because the individual mechanisms interact with each other and influence each other, reaching their maxima at different deformations at the interface [12 – 15].

The article presents and conducts a computational analysis of the changes introduced in the method of calculating the shear stress resistance at the interface according to MC2020 and EC2-1-1:2023, in comparison with MC2010 and EC2-1-1:2008. The analysis was conducted based on the work [16], taking into account the same assumptions and examples. Additionally, the analysis was extended to include the updated provisions of the standards EC2-1-1:2023 and MC2020.

### Models of shear stress resistance at the interface between concrete elements, adopted in current standards

Models for calculating the shear stress resistance at the interface between concretes cast at different times are presented in Table 1. In the descriptions focus is placed on their key assumptions and differences in relation to MC2010 and EC2 1-1:2008. Detailed presentation of outdated standards and recommendations has been omitted due to many publications that have been published on their subject [5, 15 – 20]. The provisions of the new standard EC2-1-1:2023 regarding the interface between two concretes in composite structures have already been analysed in the work [21].

**Classification of surfaces.** In MC2020 the surface of the precast element is classified as: very smooth, smooth, rough, and very rough (including the indented surface). The roughness of the surface was defined in a similar way as in MC2010, using the parameter  $R_p$ , whose value is approximately equal to half of the parameter  $R_z$  defining the average distance "from peak to valley," when dividing the analysed area into intervals. To each roughness, parameters describing the magnitude of adhesion and friction that can develop when cast-in-place concrete is placed on this surface have been assigned, and the values of these parameters are the same as in MC2010. It should be noted that in MC2020, the indented surface of the precast element has been generally classified as very rough. However, in the provisions regarding rigid bond-slip behaviour, it is stated that in the case of large keys, whose height is greater than the

cji normy EN-1992-1-1:2023 [10], przyjętej w 2024 r. do zbioru Polskich Norm jako PN-EN-1992-1-1:2024-05 [11] (EC2-1-1:2023).

Normowe modele do obliczania nośności styku bazują na założeniu współdziałania sił tarcia, adhezji, zazębiania mechanicznego oraz działania trzpieniowego w zbrojeniu zszywającym. W zależności od przyjętej procedury obliczeniowej poszczególne składniki nośności styku mogą się różnić. W badaniach naukowych często sygnalizowano, że niemożliwe jest pełne wykorzystanie nośności zbrojenia w styku, ponieważ poszczególne mechanizmy wzajemnie współdziałają oraz wpływają na siebie i osiągają maksima przy różnych odkształceniach złącza [12 – 15].

W artykule przedstawiono zmiany w sposobie obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia zgodnie z MC2020 oraz EC2-1-1:2023 w porównaniu z MC2010 i EC2-1-1:2008. Analiza została przeprowadzona na podstawie [16], uwzględniając te same założenia i przykłady. Rozszerzono ją o znowelizowane postanowienia norm EC2-1-1:2023 oraz MC2020.

### Modele nośności styku między betonami w aktualnych normach

Modele obliczania nośności styku między betonami układanymi w różnym czasie przedstawiono w tabeli 1. W opisach skupiono się na kluczowych założeniach i różnicach w odniesieniu do MC2010 oraz EC2-1-1:2008. Zrezygnowano ze szczegółowego przedstawiania nieaktualnych norm i zaleceń, ze względu na wiele istniejących opracowań [5, 15 – 20]. Zapisy nowej normy EC2-1-1:2023 w odniesieniu do styku dwóch betonów w konstrukcjach zespolonych były już przedmiotem analiz w [21].

**Klasyfikacja powierzchni.** W MC2020 powierzchnię prefabrykatu klasyfikuje się jako bardzo gładką, gładką, szorstką i bardzo szorstką (w tym powierzchnię z wrębami). Szorstkość powierzchni została określona w sposób analogiczny jak w MC2010, z wykorzystaniem parametru  $R_p$ , którego wartość jest w przybliżeniu równa połowie parametru  $R_z$  definiującego średnią odległość „od szczytu do doliny”, przy podziale analizowanego obszaru na przedziały. Każdej z szorstkości przypisano parametry opisujące wielkość adhezji i tarcia, które mogą się rozwinąć, gdy na tej powierzchni ułożony zostanie beton monolityczny, a wartości tych parametrów są takie jak w MC2010. Należy zwrócić uwagę, że w MC2020 powierzchnia prefabrykatu z wrębami została zaklasyfikowana jako bardzo szorstka. W zapisach dotyczących styków sztywnych podano jednak, że w przypadku dużych wrębów, których wysokość jest większa niż wymiar kruszywa, sytuację w styku lepiej opisywać w odniesieniu do pojedynczego wrębu. W tym celu należy zastąpić pole powierzchni ścinanej styku sumą minimalnych pól powierzchni podstaw wszystkich wrębów, stosując współczynniki  $c_a = 0,9$  oraz  $\mu = 0,9$ .

W normie EC2-1-1:2023 powierzchnia prefabrykatu zaklasyfikowana jest jako: bardzo gładka, gładka, szorstka, bardzo szorstka oraz powierzchnia z wrębami. Wartości parametrów

**Table 1. Comparative evaluation of methodology for the design shear stress resistance at the interface and the shear stress in accordance fib Model Code 2020 [9] and EN 1992-1-1:2023 [10]**

Tabela 1. Porównanie sposobów obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia oraz obliczeniowych wartości naprężeń stycznych wg fib Model Code 2020 [9] i normy EN 1992-1-1:2023 [10]

| fib Model Code 2020                                                                                                                                                  |  | EN 1992-1-1:2023                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Limit state formule/Zapis stanu granicznego                                                                                                                          |  |                                                                                                                                                             |     |
| $\tau_{Edi} \leq \tau_{Rdi}$ (1)                                                                                                                                     |  |                                                                                                                                                             |     |
| Shear stress at the interface/Napężenie w styku                                                                                                                      |  |                                                                                                                                                             |     |
| $\tau_{Edi} = \beta V_{Ed} / z b_i$ (2)                                                                                                                              |  | $\tau_{Edi} = \beta_{new} V_{Ed} / z b_i$                                                                                                                   | (3) |
|                                                                                                                                                                      |  | or/lub                                                                                                                                                      |     |
|                                                                                                                                                                      |  | $\tau_{Edi} = V_{Ed} / A_i$                                                                                                                                 | (4) |
| Design value of interface shear strength/Nośność styku                                                                                                               |  |                                                                                                                                                             |     |
| rigid bond-slip behaviouro/połączenie sztywne                                                                                                                        |  | joint with fully anchored interface reinforcement/połączenie z pełnym zakotwieniem strzemion                                                                |     |
| $\tau_{Rdi} = A + B \leq 0,25f_{cd}$                                                                                                                                 |  | $\tau_{Rdi} = c_{v1}(\sqrt{f_{ck}}/\gamma_c) + \mu_v \sigma_n + \rho_i f_{yd}(\mu_v \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,30f_{cd} + \rho_i f_{yd} \cos \alpha$ | (7) |
| $\tau_{Rdi} = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n \leq 0,25f_{cd}$ (5)                                                                                                        |  |                                                                                                                                                             |     |
| non-rigid bond-slip behaviouro/połączenie nieszttywne                                                                                                                |  | joint with partially anchored interface reinforcement/połączenie z niepełnym zakotwieniem strzemion                                                         |     |
| $\tau_{Rdi} = A + B + C \leq 0,25f_{cd}$                                                                                                                             |  | $\tau_{Rdi} = c_{v2}(\sqrt{f_{ck}}/\gamma_c) + \mu_v \sigma_n + k_{v1} \rho_i f_{yd} \mu_v + k_{dowel} \rho_i \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \leq 0,25f_{cd}$         | (8) |
| $\tau_{Rdi} = c_a f_{cd}^{1/3} + \mu \sigma_n + \kappa_{lf} \rho_i f_{yd}(\mu \sin \alpha + \cos \alpha) + \kappa_2 \rho_i \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \leq 0,25f_{cd}$ (6) |  |                                                                                                                                                             |     |

$\tau_{Edi}$  – design value of interface shear stress/obliczeniowa wartość naprężeń stycznych;  $\beta$ ,  $\beta_{new}$  – the ratio of the longitudinal force in the new concrete area and the total longitudinal force either in the compression or tension zone, both calculated for the section considered/stosunek siły podłużnej w nowym betonie do całkowitej siły podłużnej w strefie ściskanej lub rozciąganej w rozważanym przekroju;  $V_{Ed}$  – the shear force acting perpendicular to the interface/siła ścinająca działająca prostopadle do powierzchni styku;  $z$  – the lever arm of composite section /ramię sił wewnętrznych w przekroju zespolonym;  $b_i$  – the width of the interface/szerokość płaszczyzny zespolenia;  $V_{Edi}$  – the shear force parallel to the interface/siła ścinająca działająca równolegle do powierzchni styku;  $A_i$  – the area of the interface/pole powierzchni ścinanej;  $c_a$  – coefficient for shear resistance due to adhesive bond (Table 2)/współczynnik przyczepności adhezyjnej wg tabeli 2;  $c_v$  – coefficient for shear resistance due to aggregate interlock (Table 2)/współczynnik wpływu zazębienia kruszywa w szorstkim styku wg tabeli 2;  $\kappa_1$  – coefficient for axial force in interface connectors; interaction coefficient for tensile force in reinforcement or dowels (Table 2)/współczynnik interakcji siły rozciągającej w budowanej w prętach zbrojeniowych lub trzpieniach wg tabeli 2;  $\kappa_2$  – coefficient for dowel action resistance of interface connectors; interaction coefficient for flexural resistance (Table 2)/współczynnik interakcji dla nośności na zginanie wg tabeli 2;  $\sigma_n$  – the (lowest expected) compressive stress resulting from an eventual normal force acting on the interface/naprężenie ściskające wynikające z siły normalnej działającej na styk (dociskającej styk);  $\alpha$  – the angle between the interface and the anchoring reinforcement, within the range  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ /kąt pomiędzy płaszczyzną zespolenia a zbrojeniem kotwiącym, zawarty w przedziale  $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ;  $c_{v1}$ ,  $c_{v2}$  – coefficients for the shear resistance at interfaces (Table 3)/współczynniki wytrzymałości na ścinanie w styku wg tabeli 3;  $\gamma_c$  – partial factor for concrete/współczynnik częściowy dla betonu;  $k_v$  – factor depending on the roughness of interface (Table 3)/współczynnik zależny od chropowatości powierzchni prefabrykatu wg tabeli 3;  $k_{dowel}$  – factor depending on the roughness of the interface (Table 3)/współczynnik zależny od chropowatości powierzchni prefabrykatu wg tabeli 3;  $\sigma_n$  – the compressive stress over the interface area (for compressive stress  $\sigma_n$  shall not be taken larger than  $0,6f_{ctd}$  for tensile stress  $\mu_v \sigma_n = 0$ )/naprężenie normalne do powierzchni styku (przy ściskaniu nie większe niż  $0,6f_{ctd}$ , przy rozciąganiu  $\mu_v \sigma_n = 0$ );  $\alpha$  – the angle between the interface and the anchoring reinforcement, within the range  $35^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$  and  $35^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  for a very smooth surface /kąt pomiędzy płaszczyzną zespolenia a zbrojeniem kotwiącym, zawarty w przedziale  $35^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$  oraz  $35^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  dla powierzchni bardzo gładkiej;  $\tau_{Rdi}$  – design value of interface shear strength/nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia;  $\mu$ ,  $\mu_v$  – the coefficient of friction (Table 2 and 3)/współczynniki tarcia przy ścinaniu wg tabeli 2 i 3;  $f_{ck}$  – characteristic value of compressive strength of concrete after 28 days/charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach;  $f_{cd}$  – design value of compressive strength of concrete/obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie;  $f_{ctd}$  – design tensile strength of concrete/obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe;  $f_{yd}$  – design yield strength of reinforcing steel in tension/obliczeniowa wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie;  $\rho$ ,  $\rho_i$  – the ratio of reinforcement crossing the interface/stopień zbrojenia przechodzącego przez styk.

aggregate size, the situation at the interface is better described with respect to a single key. For this purpose, it is necessary to replace the area of the surface with shear keys with the sum of the base areas of all keys, using the coefficients  $c_a = 0.9$  and  $\mu = 0.9$ .

In the EC2-1-1:2023 standard, the surface of the precast element is classified as: very smooth, smooth, rough, very rough, and indented surface (surface with shear keys). The values of the parameters assigned to individual surfaces are similar to those presented in MC2020. It should be noted that in the previous edition of the EC2-1-1:2008 standard, the „very rough” surface did not exist.

**Design of shear stress resistance at the interface.** The method of calculating design of shear stress resistance at the interface in MC2020 has not been changed compared to MC2010. The procedure takes into account the interaction of individual mechanisms (according to table 1): A – *adhesion/aggregate interlock*; B – friction at the interface with the action of the *shear-friction* phenomenon in interface reinforcement; C – interface reinforcement with the influence of *dowel action*.

przypisanych poszczególnym powierzchniom są zbliżone do tych przedstawionych w MC2020. Należy zaznaczyć, że w poprzedniej edycji normy EC2-1-1:2008 powierzchnia „bardzo szorstka” nie występowała.

**Nośność styku.** Sposób obliczania nośności styku w płaszczyźnie zespolenia w MC2020 nie został zmieniony w stosunku do MC2010. Procedura uwzględnia współdziałanie poszczególnych mechanizmów (tabela 1): A – *adhezja/zazębienie* kruszywa; B – tarcia w styku z działaniem zjawiska *shear-friction* w stykach ze zbrojeniem zszywającym; C – zbrojenia z wpływem działania trzpieniowego (*dowel action*). Zarówno w MC2020, jak i w MC2010, wyróżnia się styki sztywne (bez zbrojenia zszywającego lub ze zbrojeniem o stopniu  $\rho \leq 0,05\%$ , w których poślizg pomiędzy warstwami betonu przy zniszczeniu połączenia jest mniejszy niż 0,05 mm) oraz styki nieszttywne (ze zbrojeniem zszywającym o stopniu  $\rho \geq 0,05\%$  i poślizgiem między betonami przy zniszczeniu połączenia równym ~0,5 – 1,5 mm). Nośność w płasz-

Both in MC2020 and in MC2010, rigid bond-slip behaviour (without interface reinforcement or with interface reinforcement of degree  $\rho \leq 0,05\%$ , in which the slip between the concrete layers at the failure of the connection is less than 0.05 mm) and non-rigid bond-slip behaviour (with interface reinforcement of degree  $\rho \geq 0,05\%$  and slip between concretes at the failure of the connection equal to  $\sim 0.5 - 1.5$  mm). The shear stress resistance at the interface, in rigid bond-slip behaviour and non-rigid bond-slip behaviour, in MC2020 is calculated the same as in MC2010 (Table 1, formula (5)) depending on the tensile strength of concrete. However, the value of the coefficient  $c_r$  for very rough and rough surfaces has been slightly changed (Table 2). In the case

czyżnie zespolenia zarówno w stykach sztywnych, jak i nieszywnych, jest obliczana w MC2020 tak, jak w MC2010 (tabela 1, wzór (5)) w zależności od wytrzymałości betonu na rozciąganie. Zmieniono natomiast nieco wartość współczynnika  $c_r$  w przypadku powierzchni bardzo szorstkiej oraz szorstkiej (tabela 2). W przypadku styków nieszywnych składnik *adhezji/zazębiania* w obydwu normach zależy od  $f_{cd}^{1/3}$  (tabela 1, wzór (6)). Istotnej zmianie uległo natomiast ograniczenie nośności styku. W odróżnieniu od MC2010, w MC2020 wprowadzono ograniczenie  $\tau_{Rdi} \leq 0,25f_{cd}$  w przypadku wszystkich rodzajów powierzchni prefabrykatu (tabela 1, wzory (5) i (6)).

**Table 2. Coefficients depending on the roughness of the surface as specified in fib Model Code 2020 [9]**

Tabela 2. Współczynniki w przypadku różnej szorstkości powierzchni styku wg fib Model Code 2020 [9]

| Surface roughness/Szorstkość powierzchni                                                                                              | MC2020 |                          |            |            |                        |                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------|------------|------------|------------------------|------------------------|
|                                                                                                                                       | $c_a$  | $c_r$                    | $\kappa_1$ | $\kappa_2$ | $f_{ck} \geq 20$ [MPa] | $f_{ck} \geq 35$ [MPa] |
| Very rough (including indented (keyed) $R_i \geq 3,0$ mm <sup>a)</sup> /Bardzo szorstka (w tym wręby) $R_i \geq 3,0$ mm <sup>a)</sup> | 0,5    | <b>0,22<sup>b)</sup></b> | 0,5        | 0,9        | 0,8                    | 1,0                    |
| Rough $R_i \geq 1,0$ mm <sup>a)</sup> /Szorstka $R_i \geq 1,0$ mm <sup>a)</sup>                                                       | 0,4    | <b>0,11<sup>b)</sup></b> | 0,5        | 0,9        | 0,7                    |                        |
| Smooth/Gładka                                                                                                                         | 0,2    | 0                        | 0,5        | 1,1        | 0,6                    |                        |
| Very smooth/Bardzo gładka                                                                                                             | 0,025  | 0                        | 0          | 1,5        | 0,5                    |                        |

<sup>a)</sup>  $R_i$  – roughness parameter  $R_i = 4V/\pi D^2$  according to [8]/ $R_i$  – parametr szorstkości  $R_i = 4V/\pi D^2$  wg [8]; <sup>b)</sup> change in the parameter compared to MC2010/zmiana parametru w porównaniu z MC2010

of non-rigid bond-slip behaviour the *adhesion/interlocking* in both standards depends on  $f_{cd}^{1/3}$  (Table 1, formula (6)). However, the limitation of the shear stress resistance at the interface has undergone a significant change. In contrast to MC2010, in MC2020, one limitation  $\tau_{Rdi} \leq 0,25f_{cd}$  was introduced for all types of precast element surfaces (table 1, formulas (5) and (6)).

Noticeable change in the EC2-1-1:2023 standard is the possibility of omitting the verification of shear stress resistance at the interface in the case of a very rough surface of the precast element. The condition is the use of interface reinforcement in accordance with the guidelines regarding the angle of inclination of the bars and the interface reinforcement ratio (see Fig. 8.15 b, point 12.2 in [10]). In other cases, the method of determining the shear stress resistance at the interface in the EC2-1-1:2023 standard has been significantly changed compared to EC2-1-1:2008. Two calculation variants have been foreseen. The first variant concerns interfaces without reinforcement across the interface or when the required reinforcement is fully anchored, meaning the anchorage allows the reinforcement to reach the plastic limit  $\sigma_{sd} = f_{yd}$  (Table 1, formula (7)). In the case of tensile forces occurring in the connection, their transfer should be ensured by applying additional reinforcement at the interface. Additional recommendation is to calculate the shear stress resistance according to formula (7) in composite structures consisting of slab elements or wall elements (precast), where there is a possibility of separation of the connected concrete. In such calculations, however, the coefficient  $c_{v1} = 0$  should be applied for very smooth, smooth, or rough surfaces of the precast element,  $c_{v1} = 0,19$  for very rough surfaces, and  $c_{v1} = 0,37$  for the surface with shear keys of the precast element. The influence of fatigue should also be considered in accordance with point 10.7 of standard [10].

Zauważalną zmianą w normie EC2-1-1:2023 jest umożliwienie pominięcia weryfikacji nośności styku w przypadku bardzo szorstkiej powierzchni prefabrykatu. Warunkiem jest zastosowanie zbrojenia zgodnego z wytycznymi dotyczącymi kąta nachylenia prętów oraz stopnia zbrojenia (rysunek 8.15 b, pkt 12.2 w [10]). W pozostałych przypadkach sposób wyznaczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia w normie EC2-1-1:2023 został znacznie zmieniony w porównaniu z EC2-1-1:2008. Przewidziano dwa warianty obliczeń. Pierwszy z nich dotyczy styków bez zbrojenia zszywającego lub gdy wymagane zbrojenie zszywające jest zakotwione w pełni, a więc zakotwienie pozwala na osiągnięcie w zbrojeniu granicy plastyczności  $\sigma_{sd} = f_{yd}$  (tabela 1, wzór (7)). W przypadku występowania sił rozciągających w zespoleniu, ich przenoszenie powinno być zapewnione przez zastosowanie dodatkowego zbrojenia w styku. Dodatkowym zaleceniem jest, aby w konstrukcjach zespolonych składających się z elementów płytowych lub ścian (prefabrykowanych), gdzie istnieje możliwość odspojenia łączonych betonów, nośność na ścinanie obliczać zgodnie ze wzorem (7). W obliczeniach należy jednak zastosować współczynnik  $c_{v1} = 0$  w przypadku bardzo gładkiej, gładkiej i szorstkiej powierzchni prefabrykatu lub  $c_{v1} = 0,19$  – powierzchni bardzo szorstkiej oraz  $c_{v1} = 0,37$  – powierzchni prefabrykatu z wrębami. Należy również uwzględnić wpływ zmęczenia zgodnie z punktem 10.7 normy [10].

Obliczenia zgodne z drugim wariantem należy przeprowadzić w sytuacji, gdy nie jest możliwe osiągnięcie w zbrojeniu zszywającym granicy plastyczności z powodu niepełnego jego zakotwienia (tabela 1, wzór (8)). Podobnie jak w MC2020, w drugim wariantcie EC2-1-1:2023 uwzględniono współdzia-

Calculations according to the second variant should be carried out in a situation where it is not possible to reach the plastic limit in the interface reinforcement due to its incomplete anchorage (Table 1, Formula (8)). Similarly to MC2020, in the second variant of EC2-1-1:2023, the interaction of various load-bearing components occurring at the interface is taken into account; however, it cannot be directly identified with non-rigid bond-slip behaviour as understood in MC2020. In EC2-1-1:2023, coefficients  $c_{v1}$  and  $c_{v2}$  corresponding to adhesion, as well as coefficients  $k_v$ ,  $k_{dowel}$  dependent on the roughness of the surface and describing the magnitude of *shear-friction* and *dowel action* effects (Table 3). In the normative provisions, it is noted that for all interfaces except for indented interfaces, when the surface is subjected to tension caused by an external force acting perpendicular to the interface, the coefficients  $c_{v1}$  and  $c_{v2}$  should be taken as equal to 0. In the case of the surface with shear keys, the coefficients  $c_{v2}$ ,  $k_v$ ,  $k_{dowel}$  should be determined considering the roughness of the surface on the keys. Additionally, in the second variant (incomplete anchorage of interface reinforcement), the following restrictions are applied (Formula (8)):

- if the distance of the single bars of interface reinforcement from the edge of the analysed element in the direction of the shear force is less than  $10\phi$ , then the coefficient  $k_{dowel} = 0$ ;
- the interface reinforcement should be anchored in such a way as to allow achieving stresses in the reinforcement of at least  $0,5f_{yd}$ , with a minimum anchorage length of  $8\phi$ , if no other anchorage methods are used other than with straight bars;
- when using interface reinforcement at an angle  $\alpha = 90^\circ$ , with the anchorage length as above, Formula (8) can be used with coefficients  $c_{v2} = k_v = \mu_v = 0$ .

In composite elements, the shear stresses at the interface should not exceed the design value of the shear stresses – formula (1). In elements subjected to bending, both MC2020 and EC2-1-1:2023 determine the design value of shear stresses according to the formula (respectively (2) or (3)) in a similar way as in MC2010 and EC2-1-1: 2008. In the standard EC2-1-1: 2023, additionally, the calculation of shear stresses at the interface according to formula (4) is provided in cases where the connection operates predominantly as sheared, without the influence of bending moment effects. With regard to the indented construction joint of the precast element, in EC2-1-1: 2023, additional recommendations concerning the contribution of the indented surfaces have been introduced, which will not be analysed in this article.

### Comparison of interface shear stress resistance calculation according to different procedures

Calculations of shear stress resistance at the interface were carried out according to EC2-1-1:2023 and MC2020. The results

of different load-bearing components occurring at the interface are taken into account; however, it cannot be directly identified with non-rigid bond-slip behaviour as understood in MC2020. In EC2-1-1:2023, coefficients  $c_{v1}$ ,  $c_{v2}$  corresponding to adhesion, as well as coefficients  $k_v$ ,  $k_{dowel}$  dependent on the roughness of the surface and describing the magnitude of *shear-friction* and *dowel action* effects (Table 3). In the normative provisions, it is noted that for all interfaces except for indented interfaces, when the surface is subjected to tension caused by an external force acting perpendicular to the interface, the coefficients  $c_{v1}$  and  $c_{v2}$  should be taken as equal to 0. In the case of the surface with shear keys, the coefficients  $c_{v2}$ ,  $k_v$ ,  $k_{dowel}$  should be determined considering the roughness of the surface on the keys. Additionally, in the second variant (incomplete anchorage of interface reinforcement), the following restrictions are applied (Formula (8)):

**Table 3. Coefficients depending on the roughness of the surface as specified in EN 1992-1-1:2023 [10]**

*Tabela 3. Współczynniki w przypadku różnej szorstkości powierzchni styku wg EN 1992-1-1:2023 [10]*

| Surface roughness/<br>Szorstkość powierzchni        | EC2-1-1:2023       |         |                    |                 |                 |
|-----------------------------------------------------|--------------------|---------|--------------------|-----------------|-----------------|
|                                                     | $c_{v1}$           | $\mu_v$ | $c_{v2}$           | $k_v$           | $k_{dowel}$     |
| Indented (keyed) <sup>b)</sup> /Wręby <sup>b)</sup> | 0,37               | 0,9     | — <sup>b)</sup>    | — <sup>b)</sup> | — <sup>b)</sup> |
| Very rough/Bardzo szorstka                          | 0,19 <sup>a)</sup> | 0,9     | 0,15 <sup>a)</sup> | 0,5             | 0,9             |
| Rough/Szorstka                                      | 0,15 <sup>a)</sup> | 0,7     | 0,08 <sup>a)</sup> | 0,5             | 0,9             |
| Smooth/Gładka                                       | 0,08 <sup>a)</sup> | 0,6     | 0                  | 0,5             | 1,1             |
| Very smooth/Bardzo gładka                           | 0,01 <sup>a)</sup> | 0,5     | 0                  | 0               | 1,5             |

<sup>a)</sup> when the surface is subjected to tensile stresses caused by external axial force in perpendicular direction:  $c_{v1} = 0$ ,  $c_{v2} = 0$ /gdy powierzchnia prefabrykatu poddawana jest rozciąganiu wywołanemu przez siłę zewnętrzną działającą prostopadle do styku:  $c_{v1} = 0$ ,  $c_{v2} = 0$ ; <sup>b)</sup> the factors for keyed interfaces shall be applied for the area of each key/współczynniki w przypadku powierzchni z wrębami należy przyjmować, uwzględniając szorstkość powierzchni na wrębach

■ jeżeli odległość pręta zsiwywającego od krawędzi analizowanego elementu w kierunku działania siły ścinającej jest mniejsza niż  $10\phi$ , to współczynnik  $k_{dowel} = 0$ ;

■ zbrojenie zsiwywające powinno być zakotwione tak, aby możliwe było uzyskanie naprężeń w zbrojeniu co najmniej  $0,5f_{yd}$ , przy minimalnej długości zakotwienia  $8\phi$ , jeżeli nie stosuje się innych metod zakotwienia niż za pomocą prętów prostych;

■ w przypadku zastosowania zbrojenia zsiwywającego pod kątem  $\alpha = 90^\circ$ , z długością zakotwienia jak wyżej, można stosować wzór (8) ze współczynnikami  $c_{v2} = k_v = \mu_v = 0$ .

W elementach zespolonych naprężenia ścinające styk nie powinny przekraczać obliczeniowej wartości naprężeń stycznych – wzór (1). W elementach zginanych, zarówno MC2020, jak i EC2-1-1:2023, obliczeniową wartość naprężeń stycznych określa się zgodnie ze wzorami odpowiednio (2) lub (3) w analogiczny sposób jak w MC2010 i EC2-1-1:2008. W normie EC2-1-1:2023 przewidziano dodatkowo obliczanie naprężeń w styku wg wzoru (4) w przypadkach, gdy połączenie pracuje w przeważającej większości jako ścinane, bez udziału efektów momentu zginającego. W odniesieniu do powierzchni prefabrykatu z wrębami w EC2-1-1:2023 wprowadzono dodatkowe zalecenia dotyczące udziału powierzchni wrębów, które nie będą analizowane w niniejszym artykule.

### Porównanie nośności styków obliczonej z zastosowaniem różnych procedur

Obliczenia nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia przeprowadzono zgodnie z EC2-1-1:2023 oraz MC2020. Wyniki porównano z obliczeniami wg EC2-1-1:2008 oraz

were compared with calculations according to EC2-1-1:2008 and MC2010, which were presented in article [16]. Calculations were performed in two variants: with the use of interface reinforcement between concrete cast at different times and without interface reinforcement between the concrete. For the calculations, the following concrete strength parameters were adopted [16]:  $f_{ck} = 20$  MPa,  $f_{cd} = 20/1.5 = 13.33$  MPa,  $f_{ctk,0.05} = 1.5$  MPa,  $f_{ctd} = 1.5/1.5 = 1.0$  MPa. For joints with interface reinforcement, it was assumed that the interface reinforcement is perpendicular to the joint ( $\alpha = 90^\circ$ ), a reinforcement ratio of the joint  $\rho = 0.5\%$  was assumed, and the design yield strength of the reinforcement  $f_{yd} = 420$  MPa. In both cases, it was assumed that the interface is not compressed by an external force ( $\sigma_n = 0$ ).

The first element of comparison is the limiting value of the shear stress at the interface (Table 4). According to MC2020, as well as EC2-1-1:2008 and EC2-1-1:2023, regardless of the type of precast element surface and the classification of the joint as rigid or non-rigid bond-slip behaviour, the limiting shear stress at the interface is constant. However, in MC2010, for non-rigid bond-slip behaviour joints, the influence of the precast element surface on the obtained results was taken into account. It seems that this was justified, because after the separation of the new concrete from the precast element, mechanical interactions and the *shear-friction* phenomenon begin to have a greater influence on the shear stress of the interface. Among all the analysed procedures, the highest design interface shear strengths were obtained according to EC2-1-1:2023 for interfaces with fully anchored interface reinforcement (i.e., 4.00 MPa). This procedure assumes full utilization of the load-bearing components related to shear stress.

In Table 5, the design shear stress resistance at the interface without shear reinforcement, determined according to the standard EC2-1-1:2008 and MC2010, as well as according to MC2020 for the case of a rigid bond-slip behaviour (formula (5)) and EC2-1-1:2023 using the appropriate formula corresponding to full anchorage interface reinforcement (formula (7)). The values obtained according to EC2-1-1:2008, MC2010, and MC2020 are identical. In the case of EC2-1-1:2023, the values are similar for shear stress resistance of a very smooth surface, but with the increase in the roughness of the interface, the differences between the obtained values become more significant. The largest differences occur for the surface of the

MC2010, które zostały przedstawione w [16]. Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach: z zastosowaniem zbrojenia zszywającego pomiędzy betonami układanymi w różnym czasie oraz bez zbrojenia w styku. Do obliczeń przyjęto następujące parametry wytrzymałościowe betonu [16]:  $f_{ck} = 20$  MPa,  $f_{cd} = 20/1.5 = 13.33$  MPa,  $f_{ctk,0.05} = 1.5$  MPa,  $f_{ctd} = 1.5/1.5 = 1.0$  MPa. W stykach ze zbrojeniem zszywającym przyjęto, że zbrojenie jest prostopadłe do styku ( $\alpha = 90^\circ$ ), założono stopień zbrojenia styku  $\rho = 0.5\%$  oraz granicę plastyczności zbrojenia  $f_{yd} = 420$  MPa. W obydwu przypadkach przyjęto, że styk nie jest dociskany siłą zewnętrzną ( $\sigma_n = 0$ ).

Pierwszym elementem porównania jest wartość ograniczająca nośność styku (tabela 4). Zgodnie z MC2020, a także EC211:2008 i EC211:2023, niezależnie od rodzaju powierzchni prefabrykatu oraz klasyfikacji styku jako sztywnego lub niesztywnego, wartość ograniczająca naprężenie w styku jest stała. Tymczasem w MC2010 w stykach niesztywnych uwzględniany był wpływ powierzchni prefabrykatu na otrzymywane wyniki. Wydaje się, że było to zasadne, ponieważ po odspojeniu betonu uzupełniającego od prefabrykatu, większy wpływ na nośność styku zaczynają mieć oddziaływania mechaniczne oraz zjawisko *shear-friction*. Ze wszystkich analizowanych procedur największe naprężenia ograniczające nośność styku otrzymano zgodnie z EC2-1-1:2023 w przypadku styków z całkowitym zakotwieniem strzemion zszywających (tj. 4,00 MPa). Procedura ta zakłada pełne wykorzystanie składowych nośności związanych z przenoszeniem ścinania.

W tabeli 5 przedstawiono obliczeniową nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia bez zbrojenia zszywającego w styku ustaloną zgodnie z normą EC2-1-1:2008 oraz MC2010, a także wg MC2020 w przypadku połączenia sztywnego (wzór (5)) i EC2-1-1:2023, stosując wzór odpowiadający pełnemu zakotwieniu strzemion (wzór (7)). Wartości uzyskane zgodnie z EC-1-1:2008, MC2010 i MC2020 są identyczne. W przypadku EC2-1-1:2023 wartości są zbliżone do nośności powierzchni bardzo gładkiej, jednak wraz ze zwiększeniem szorstkości styku zwiększa się różnica pomiędzy otrzymanymi wartościami. Największe różnice występują w przypadku powierzchni prefabrykatu z wrębami, tj. obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespo-

**Table 4. Ultimate shear stresses at the interface according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023**

*Tabela 4. Graniczne naprężenia w styku wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023*

| Surface roughness/<br>Rodzaj powierzchni | Limit state at the interface [MPa]/Graniczne naprężenia w styku [MPa] |                             |                       |                             |                                   |                                                              |                                                                 |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                          | MC2010                                                                |                             | MC2020                |                             | EC2-1-1:2008                      | EC2-1-1:2023                                                 |                                                                 |
|                                          | rigid/styk                                                            |                             |                       |                             | unclassified/<br>bez klasyfikacji | full anchorage<br>stirrups/pełne<br>zakotwienie<br>strzemion | partial anchorage<br>stirrups/niepełne<br>zakotwienie strzemion |
|                                          | bond-slip/<br>sztywny                                                 | non bond-slip/<br>nieztywny | bond-slip/<br>sztywny | non bond-slip/<br>nieztywny |                                   |                                                              |                                                                 |
| Very smooth/Bardzo gładka                | 3,66                                                                  | 2,20                        | 3,33                  | 3,33                        | 3,66                              | 4,00                                                         | 3,33                                                            |
| Smooth/Gładka                            | 3,66                                                                  | 2,93                        | 3,33                  | 3,33                        | 3,66                              | 4,00                                                         | 3,33                                                            |
| Rough/Szorstka                           | 3,66                                                                  | 3,66                        | 3,33                  | 3,33                        | 3,66                              | 4,00                                                         | 3,33                                                            |
| Very rough/Bardzo szorstka               | 3,66                                                                  | 3,66                        | 3,33                  | 3,33                        | -                                 | 4,00                                                         | 3,33                                                            |
| Indented (keyed)/Wręby                   | 3,66                                                                  | 3,66                        | 3,33                  | 3,33                        | 3,66                              | 4,00                                                         | 3,33                                                            |

precast element with indented (keyed), i.e., the design shear stress resistance at the interface according to EC2-1-1:2023 is 120% larger than the values obtained from the other procedures. This results from the change in the method of calculating the *adhesion/interlock* component compared to the analysed procedures and from separating the surface of the precast element with indented (keyed) as a separate surface compared to MC2010 and MC2020.

The third stage of the analysis included the shear resistance of the reinforced interface, and its results concerning different surfaces of the precast element and the participation of the shear reinforcement are presented in figures 1 – 5 (taking into account the contribution of individual components in the final value). Calculations according to MC2020 were performed for non-rigid bond-slip behaviour, while calculations according to EC2-1-1:2023 were carried out in two variants: connection with joint full anchorage interface reinforcement to formula (7) (EC2-1-1:2023/W1) and joint with partially anchored interface reinforcement according to formula (8) (EC2-1-1:2023/W2). In none of the cases were the stresses limiting the shear stress resistance of the interface exceeded (table 4).

On figure 1, a comparison of the design shear stress resistances at the interface for a very smooth surface is presented. The obtained values according to EC2-1-1:2008 and EC2-1-1:2023/W1 are similar. Differences occur in the component related to *adhesion/interlocking*. In the case of MC2010, MC2020, and EC2-1-1:2023/W2, identical effects of *dowel action* were obtained.

In the case of a smooth surface (Figure 2), the design shear stress resistance at the interface according to EC2-1-1:2023/W1 is 2.74% larger than the value according to EC2-1-1:2008. The values obtained according to MC2010, MC2020, and

**Table 5. Design shear stress resistance at the interface without reinforcement across the interface according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023**

*Tabela 5. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia bez zbrojenia zszywającego w styku wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023*

| Surface roughness/<br>Rodzaj powierzchni | Design shear stress resistance at the interface [MPa]/<br>Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia [MPa] |        |                            |              |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------|--------------|
|                                          | MC2010 <sup>a)</sup>                                                                                                       | MC2020 | EC2-1-1:2008 <sup>a)</sup> | EC2-1-1:2023 |
| Very smooth/Bardzo gładka                | 0,025                                                                                                                      | 0,025  | 0,025                      | 0,030        |
| Smooth/Gładka                            | 0,20                                                                                                                       | 0,20   | 0,20                       | 0,24         |
| Rough/Szorstka                           | 0,40                                                                                                                       | 0,40   | 0,40                       | 0,45         |
| Very rough/Bardzo szorstka               | 0,50                                                                                                                       | 0,50   | –                          | 0,57         |
| Indented (keyed)/Wręby                   | 0,50                                                                                                                       | 0,50   | 0,50                       | 1,10         |

<sup>a)</sup> according to [16]/wg [16]

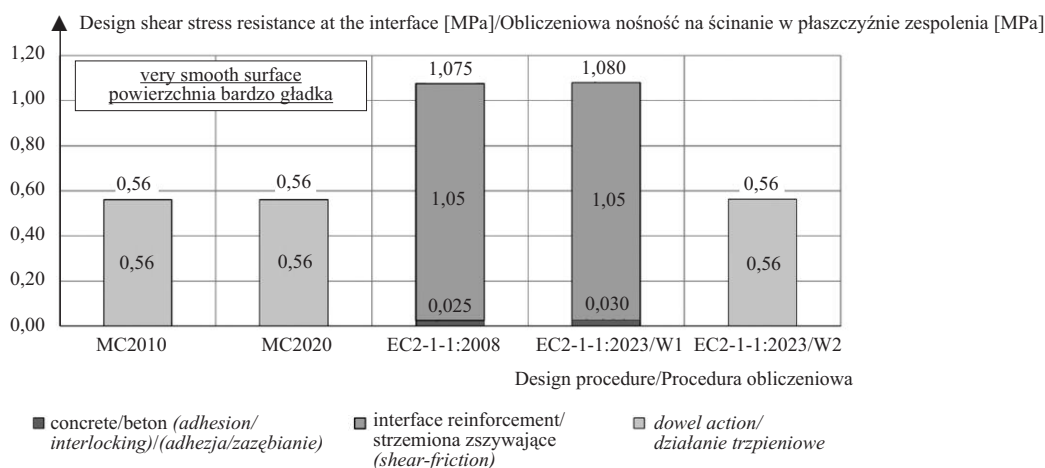
lenia wg EC2-1-1: 2023 jest o 120% większa niż wartości uzyskane z zastosowaniem pozostałych procedur. Wynika to ze zmiany sposobu obliczania składnika *adhezji/zazębienia* oraz z wydzielenia powierzchni prefabrykatu z wrębami, jako oddzielnej powierzchni w porównaniu z MC2010 i MC2020.

Trzeci etap analiz obejmował nośność styku zbrojonego, a jego wyniki w od-

niesieniu do różnych powierzchni prefabrykatu oraz udziału zbrojenia zszywającego, przedstawiono na rysunkach 1 – 5 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników w wartości końcowej). Obliczenia zgodnie z MC2020 wykonano w przypadku styków niesztynnych, a obliczenia wg EC2-1-1:2023 przeprowadzono w dwóch wariantach, tj. połączenia z pełnym zakotwieniem strzemion wg wzoru (7) (EC2-1-1:2023/W1) oraz połączenia z niepełnym zakotwieniem strzemion wg wzoru (8) (EC2-1-1:2023/W2). W żadnym z przypadków naprężenia ograniczające nośność styku nie zostały przekroczone (tabela 4).

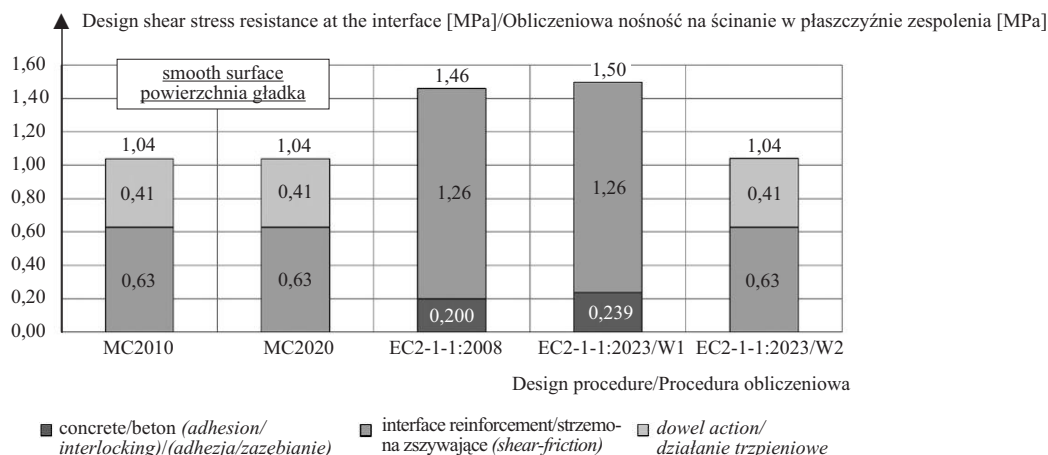
Na rysunku 1 przedstawiono porównanie obliczeniowych nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia w przypadku powierzchni bardzo gładkiej. Uzyskane wartości wg EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023/W1 są zbliżone. Różnice występują w składniku związanym z *adhezją/zazębieniem*. W przypadku MC2010, MC2020 oraz EC2-1-1:2023/W2 uzyskano identyczne efekty zjawiska *dowel action*.

W przypadku gładkiej powierzchni (rysunek 2) obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia wg EC2-1-1:2023/W1 jest o 2,74% większa od wartości wg EC2-1-1:2008. Wartości otrzymane wg MC2010, MC2020



**Fig. 1. Design shear stress resistance at the interface with a very smooth surface of a precast element according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023 (considering the contribution of individual components)**

*Rys. 1. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z bardzo gładką powierzchnią prefabrykatu wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników)*



**Fig. 2. Design shear stress resistance at the interface with a smooth surface of a precast element according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023 (considering the contribution of individual components)**

Rys. 2. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z gładką powierzchnią prefabrykatu wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników)

EC2-1-1:2023/W2 are identical. It is worth noting that the procedures of EC2-1-1:2008 and EC2-1-1:2023/W1, when calculating the *shear stress* resistance, consider only the effect of *adhesion/interlocking* and the *shear-friction* phenomenon, while the procedures of MC2010, MC2020, and EC2-1-1:2023/W2 consider exclusively the *shear-friction* and *dowel action* phenomena.

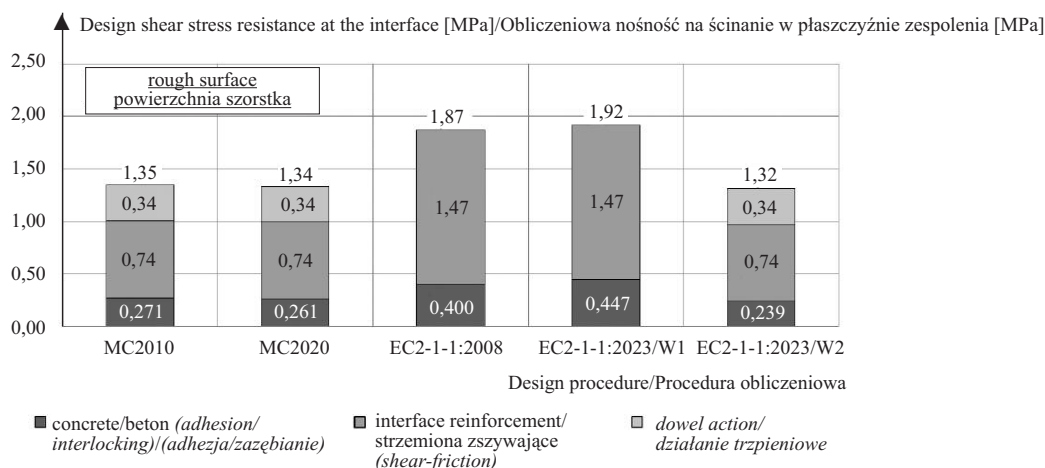
Figure 3 presents a comparison of the design shear stress resistance at the interface with the rough surface of the precast element and with interface reinforcement. The highest values were obtained in the case of calculations according to the standard EC2-1-1:2023/W1 and the standard EC2-1-1:2008. The provisions of MC2010, MC2020, and EC2-1-1:2023/W2 for rough surfaces in their procedures include both *adhesion/interlocking* and phenomena of *shear-friction* and *dowel action*. Small differences in the obtained values result from the component of *adhesion/interlocking*.

Figure 4 presents the calculation results for a very rough surface. In the standard EC2-1-1:2008, such a type of surface is not specified, therefore it was not included in the analysis. Similarly,

oraz EC2-1-1:2023/W2 są identyczne. Warto zaznaczyć, że procedury EC2-1-1:2008 i EC2-1-1:2023/W1 w przypadku obliczania nośności uwzględniają tylko efekt *adhezji/zazębiania* i zjawisko *shear-friction*, a procedury MC2010, MC2020 oraz EC2-1-1:2023/W2 uwzględniają wyłącznie zjawiska *shear-friction* i *dowel action*.

Rysunek 3 przedstawia porównanie nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z szorstką powierzchnią prefabrykatu i zbrojeniem zszywającym. Największe wartości uzyskano w przypadku obliczeń wg norm EC2-1-1:2023/W1 oraz EC2-1-1:2008. Zapisy MC2010, MC2020 oraz EC2-1-1:2023/W2 w przypadku powierzchni szorstkiej w procedurach uwzględniają zarówno *adhezję/zazębianie*, jak i zjawiska *shear-friction* oraz *dowel action*. Niewielkie różnice w uzyskanych wartościach wynikają ze składnika *adhezji/zazębiania*.

Wyniki obliczeń w przypadku bardzo szorstkiej powierzchni przedstawiono na rysunku 4. W normie EC2-1-1:2008 nie wyszczególniono takiego rodzaju powierzchni, dlatego nie uwzględniono jej w analizie. Podobnie jak w przypadku szorst-



**Fig. 3. Design shear stress resistance at the interface with a rough surface of a precast element according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023 (considering the contribution of individual components)**

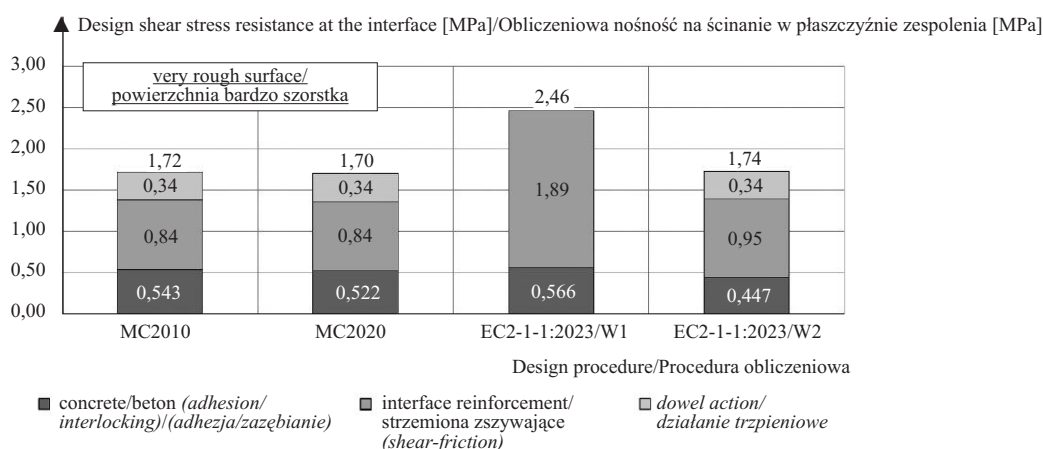
Rys. 3. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z szorstką powierzchnią prefabrykatu wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników)

as for the rough surface, the values obtained based on the procedures of MC2010, MC2020, and EC2-1-1:2023/W2 are similar, and the differences result from a different approach to calculating the *adhesion/interlock* component. The values obtained from calculations carried out according to the procedure EC2-1-1:2023/W1 are approximately 42.2% larger than the values obtained according to MC2010, MC2020, and EC2-1-1:2023/W2.

Figure 5 presents the design shear stress resistance at the interface with indented (keyed) surface and interface reinforcement. Additionally, calculations were performed according to the standard EC2-1-1:2023/W2 (the connection joint with partially anchored interface reinforcement formula (8)), taking into account the influence of the roughness of the concrete surface at the shear keys (Table 3). The highest value of shear stress resistance at the interface was obtained according to the standard

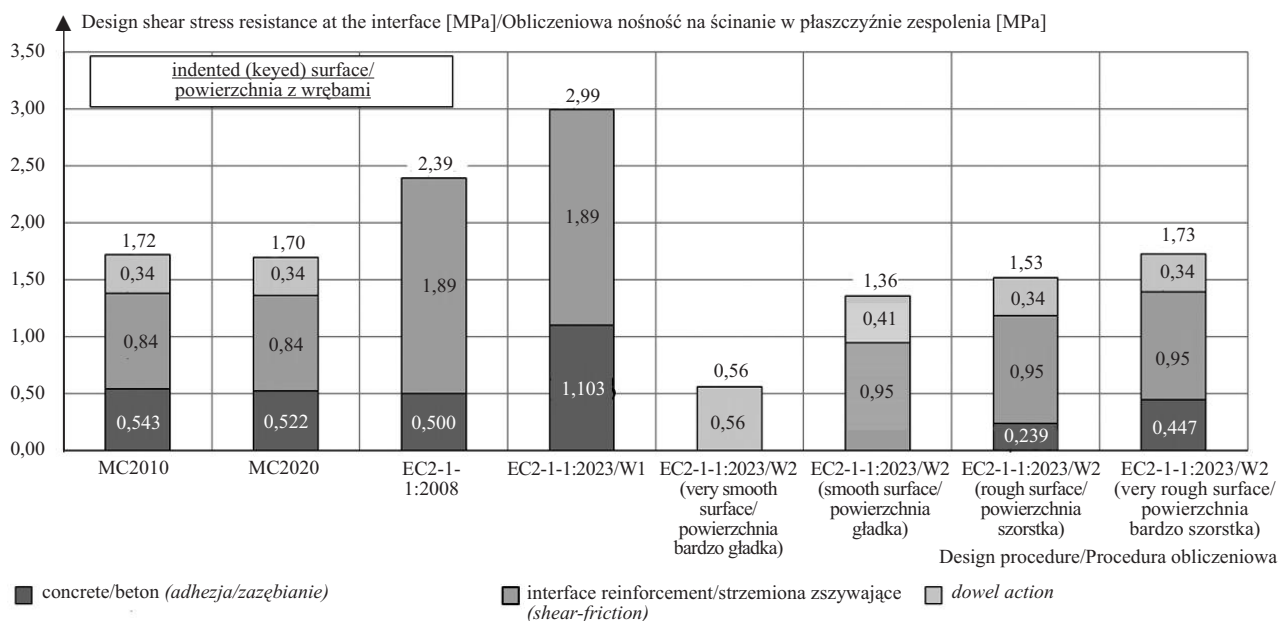
kiej powierzchni wartości uzyskane na podstawie procedur MC2010, MC2020 oraz EC2-1-1:2023/W2 są podobne, a różnice wynikają z innego podejścia do obliczania składnika *adhezja/zazębienie*. Wartości uzyskane z obliczeń przeprowadzonych w EC2-1-1:2023/W1 są ok. 42,2% większe od wartości uzyskanych zgodnie z MC2010, MC2020 i EC2-1-1:2023/W2.

Na rysunku 5 przedstawiono obliczeniową nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z powierzchnią prefabrykatu z wrębami i zbrojeniem zszywającym. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia wg normy EC2-1-1:2023/W2 (połączenie z niepełnym zakotwieniem strzemion wzór (8)), uwzględniając wpływ szorstkości powierzchni betonu na wrębach (tabela 3). Największą wartość nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia uzyskano wg normy EC2-1-1:2023/W1, tj. 2,99 MPa, i jest ona większa o 25,1% od wartości uzyska-



**Fig. 4. Design shear stress resistance at the interface with a very rough surface of a precast element according to MC2010, MC2020 and EN 1992-1-1:2023 (considering the contribution of individual components)**

Rys. 4. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z bardzo szorstką powierzchnią prefabrykatu wg MC2010, MC2020 oraz EC2-1-1:2023 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników)



**Fig. 5. Design shear stress resistance at the interface with a keyed surface of a precast element according to MC2010, MC2020, EN 1992-1-1:2008 and EN 1992-1-1:2023 (considering the contribution of individual components)**

Rys. 5. Obliczeniowa nośność na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia z powierzchnią prefabrykatu z wrębami wg MC2010, MC2020, EC2-1-1:2008 oraz EC2-1-1:2023 (z uwzględnieniem udziału poszczególnych składników)

EC2-1-1:2023/W1, i. e., 2.99 MPa, which is 25.1% higher than the value obtained according to EC2-1-1:2008. The difference arises from a different method of calculating the component related to *adhesion/interlocking*. According to EC2-1-1:2023/W1, the value of the component related to *adhesion/interlocking* is 120.6% higher than that obtained according to EC2-1-1:2008. The comparison between MC2010 and MC2020 shows small differences in values, which also stem from the change in the method of considering the *adhesion/interlocking* component. The shear resistance according to EC2-1-1:2023/W1 is approximately 73% higher than according to MC2010 and MC2020.

In the calculations of the indented interface according to EC2-1-1:2023, in the case of joint with partially anchored interface reinforcement, situations were considered where the surface of the keyed is very smooth, smooth, rough, and very rough (Figure 5). The smallest value, as expected, was achieved for the very smooth surface, i.e., 0.56 MPa. In this case, the calculation method for the shear stress resistance at the interface takes into account only the dowel action phenomenon. This is a value significantly smaller than that obtained at the interface with indented (keyed) surface without interface reinforcement, i.e., 1.10 MPa (Table 5), which raises some concerns regarding the validity of the procedure under these conditions. With the change in the roughness of the concrete surface on the keyed, the EC2-1-1:2023/W2 procedure considers the phenomena of shear-friction and dowel action. The largest value was obtained for the very rough surface, and it is almost identical to the values according to the MC2010 and MC2020 procedures.

## Summary

The method of calculation the shear stress resistance at the interface has changed over the years. Some of these changes were revolutionary, while others were evolutionary. In the works [1-5], it can be observed that the authors' approach to the subject matter was primarily revolutionary. However, it is worth noting that the provisions for calculating the shear stress resistance at the interface, presented in work [5], became the starting point for a more evolutionary approach that was gradually introduced in [6 – 9]. The latest standard [10] introduces more revolutionary and less evolutionary provisions compared to previous procedures included in the standardization. However, it should be noted that the nature of the changes presented in standard [10] still fits into the descriptions of phenomena acting at the interface presented in work [5].

**Based on the analyses of procedures for calculating the shear stress resistance at the interface and calculation examples according to standards EC2-1-1:2008 and EC2-1-1:2023, as well as procedures of MC2010 and MC2020, the following conclusions can be formulated:**

- the changes introduced in MC2020 regarding the calculations of shear stress resistance at the interface are minor compared to changes introduced in MC2010. The differences stem from the method used to calculate the design shear strength resistance at the interface. Additionally, the provisions of MC2020 allow for the determination of shear stress resistance for a precast surface with high keyed by considering the contribution of individual keyed;

nej według EC2-1-1:2008. Różnica wynika z innego sposobu obliczania składnika związanego z *adhezją/zazębieniem*. Zgodnie z EC2-1-1:2023/W1 wartość składnika związanego z *adhezją/zazębieniem* jest o 120,6% większa od obliczonego wg EC2-1-1:2008. Porównanie pomiędzy MC2010 a MC2020 wskazuje na niewielkie różnice wartości, które wynikają również ze zmiany sposobu uwzględniania składnika *adhezja/zazębienie*. Nośność na ścinanie wg EC2-1-1:2023/W1 jest o ~73% większa niż wg MC2010 i MC2020.

W obliczeniach powierzchni styku z wrębami wg EC2-1-1:2023 w przypadku niepełnego zakotwienia rozważono sytuacje, gdy powierzchnia wrębów jest bardzo gładka, gładka, szorstka i bardzo szorstka (rysunek 5). Najmniejszą wartość, zgodnie z oczekiwaniami, osiągnięto dla powierzchni bardzo gładkiej, tj. 0,56 MPa. W tym przypadku procedura w obliczania nośności styku uwzględnia tylko zjawisko *dowel action*. Jest to wartość znacznie mniejsza niż ta, którą uzyskano w styku z powierzchnią prefabrykatu z wrębami bez zbrojenia zszywającego, tj. 1,10 MPa (tabela 5), co budzi pewne wątpliwości co do poprawności procedury przy takich założeniach. Procedura EC2-1-1:2023/W2 wraz ze zmianą szorstkości powierzchni betonu na wrębach uwzględnia zjawiska *shear-friction* oraz *dowel action*. Największą wartość uzyskano w przypadku powierzchni bardzo szorstkiej i jest ona prawie identyczna z wartościami wg procedur MC2010 oraz MC2020.

## Podsumowanie

Sposób obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia zmieniał się na przestrzeni lat. Część z nich miała charakter rewolucyjny, a część ewolucyjny. W [1 – 5] podejście autorów miało charakter rewolucyjny. Jednakże warto zauważyć, że zapisy sposobu obliczania nośności w płaszczyźnie zespolenia, przedstawione w [5], stały się punktem wyjścia do bardziej ewolucyjnego podejścia, które było stopniowo wprowadzane w [6 – 9]. Najnowsza norma [10] wprowadza jednak bardziej rewolucyjne, a mniej ewolucyjne, zapisy w porównaniu z poprzednimi procedurami uwzględnianymi w normalizacji. Należy jednak zaznaczyć, że charakter zmian, przedstawiony w normie [10], w dalszym ciągu wpisuje się w opisy zjawisk działających w styku przedstawionych w [5].

**Na podstawie analiz procedur obliczania nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia oraz przykładów obliczeniowych wg norm EC2-1-1:2008 i EC2-1-1:2023 oraz procedur MC2010 i MC2020 można sformułować następujące wnioski:**

- zmiany wprowadzone w MC2020 dotyczące obliczeń nośności na ścinanie w płaszczyźnie zespolenia są nieznaczne w stosunku do MC2010. Różnice występują w sposobie obliczeń granicznych naprężeń w styku. Dodatkowo zapisy MC2020 dają możliwość wyznaczenia nośności styku z powierzchnią prefabrykatu z wysokimi wrębami poprzez uwzględnienie udziału poszczególnych wrębów;
- w przypadku styków niesztynnych procedury MC2010 i MC2020 uwzględniają możliwość zarysowania styku, co

• the procedures of MC2010 and MC2020, in the case of non-rigid bond-slip behaviour, consider the possibility of cracking at the interface, which can occur in actual structures. The EC2-1-1:2023 standard in the EC2-1-1:2023/W1 procedure, as well as the earlier version of the standard EC2-1-1:2008, do not consider the fact that the individual components of the shear stress resistance reach their maxima at different deformations occurring between the concretes. In the EC2-1-1:2023/W2 procedure, interaction coefficients  $k_v$  and  $k_{dowel}$  are included, which are termed coefficients dependent on the surface roughness; however, this procedure cannot be directly equated with a non-rigid interface. Procedure EC2-1-1:2023/W2 in almost all analysed cases (except for very smooth surfaces and smooth surfaces with keyed), allows for obtaining shear stress resistance values comparable to those obtained based on the models contained in MC2010 and MC2020. This suggests a certain conceptual affinity between the non-rigid bond-slip behaviour in MC2020 and the interface with joint with partially anchored interface reinforcement in EC2-1-1:2023;

• in EC2-1-1:2023, when calculating the shear stress resistance at the interface with a precast surface with keyed, it is justified to assume the use of roughness coefficients depending on the preparation of the concrete surface on the keyed; however, the value of the coefficients and the method of calculating the component responsible for *adhesion/interlocking* may raise doubts, especially in the case of very smooth surfaces of the keyed;

• the distinction in the standard EC2-1-1: 2023 between interfaces with full and partial anchorage interface reinforcement may raise doubts. Without conducting laboratory tests, it is difficult to definitively determine the susceptibility of the stirrups to pull-out.

Received: 30.05.2025

Revised: 18.08.2025

Published: 21.11.2025

może mieć miejsce w rzeczywistej konstrukcji. Norma EC2-1-1:2023 w procedurze EC2-1-1:2023/W1, jak i wcześniejsza wersja normy EC2-1-1:2008, nie uwzględniają, że poszczególne składniki nośności styku osiągają maksima przy różnych odkształceniach występujących pomiędzy betonami. W procedurze EC2-1-1:2023/W2 uwzględniono współczynniki interakcyjne  $k_v$ ,  $k_{dowel}$ , które nazwano współczynnikami zależnymi od chropowatości powierzchni, jednakże nie można tej procedury bezpośrednio utożsamiać ze stykiem niesztynnym. Procedura EC-1-1:2023/W2 prawie we wszystkich analizowanych przypadkach (z wyjątkiem powierzchni bardzo gładkiej i gładkiej na wrębach) pozwala na uzyskanie wartości nośności porównywalnych do osiąganych stosując modele zawarte w MC2010 oraz MC2020. Sugeruje to pewne powinowactwo pojęciowe pomiędzy połączeniem niesztynnym z MC2020, a połączeniem z niepełnym zakotwieniem strzemion z EC2-1-1:2023;

• w EC2-1-1:2023 przy obliczaniu nośności styku z powierzchnią prefabrykatu z wrębami zasadnie założono przyjmowanie współczynników szorstkości w zależności od przygotowania powierzchni betonu na wrębach, jednakże wartość współczynników oraz sposób obliczania składnika odpowiadającego za *adhezję/zazębienie* może budzić wątpliwości, zwłaszcza w przypadku bardzo gładkiej powierzchni wrębów;

• rozróżnienie w EC2-1-1:2023 styku z pełnym oraz niepełnym zakotwieniem strzemion może budzić wątpliwości. Bez przeprowadzenia badań laboratoryjnych trudno jednoznacznie określić podatność zbrojenia zsywającego na wyciąganie.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 18.08.2025 r.

Opublikowano: 21.11.2025 r.

## Literature

- [1] Birkeland PW, Birkeland HW. Connections in Precast Concrete Construction. ACI Journal Proceedings. 1966. DOI: 10.14359/7627.
- [2] Mattock AH, Hawkins NM. Shear Transfer in Reinforced Concrete – Recent Research. PCI Journal. 1972. DOI: 10.15554/pci.03011972.55.75.
- [3] Loov RE. Design of precast connections. Paper presented at a seminar organized by Compa International Pte, Ltd. Singapore. 1978; 8.
- [4] Walraven J, Frenay J, Puijssers A. Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members. PCI Journal. 1987. DOI: 10.15554/pci.01011987.66.84.
- [5] Randl N. Investigations on transfer of forces between old and new concrete at different joint roughness. University of Innsbruck, 1997.
- [6] PN-B-03264:2002, Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] PN-EN 1992-1-1:2008, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [8] Ajdukiewicz A. Pre-norma konstrukcji betonowych: *fib* Model Code 2010. T. 1-2. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2014.
- [9] Fédération Internationale du Béton. Task Group 10.1 Model Code 2020., *Fib* model code for concrete structures (2020). Version 1. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2023.
- [10] EN 1992-1-1:2023, Eurocode 2. Design of concrete structures. General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures.
- [11] PN-EN 1992-1-1:2024-05, Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne oraz reguły dla budynków, mostów i konstrukcji inżynierskich.

- [12] Santos PMD, Júlio ENBS. Interface shear transfer on composite concrete members. ACI Struct J. 2014. DOI: 10.14359/51686543.
- [13] Halicka A. Studium stanu naprężeń i odkształceń w płaszczyźnie styku i strefie przypodporowej elementów zespolonych z udziałem betonów skurczowych i ekspansyjnych. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane, 2007.
- [14] Sadowski G. Wpływ parametrów geometrycznych i fizycznych profilowanej powierzchni styku na pracę statyczną żelbetowych belek zespolonych : rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska WBMiP, Płock, 2022.
- [15] Gołdyn M, Urban T. Zespolenie betonu zwykłego z lekkim betonem kruszywowym w świetle badań i procedur projektowych. Przegląd Budowlany. 2025. DOI: 10.5604/01.3001.0055.0046.
- [16] Halicka A, Jabłoński Ł. Styk między betonami układanymi w różnym czasie – parametry i nośność według *fib* Model Code 2010. Inżynieria i Budownictwo. 2015; vol. 71, no. 7, pp. 346 – 350.
- [17] Kamiński M, Kmiecik P. Obliczanie połączenia prefabrykatów żelbetowych z nadbetonem konstrukcyjnym – przegląd wytycznych normowych. Przegląd Budowlany. 2011; vol. 82, no. 6, pp. 69–73.
- [18] Wieneke KM. Horizontal Shear Design of Concrete Interfaces in Beam and Slab Structures. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. 2019; p. 338.
- [19] Fekas K, Moretti M. Shear resistance of interfaces between existing and new RC elements. CESARE'14 International Conference Civil Engineering for Sustainability and Resilience. 2013; p. 9.
- [20] Kwon SJ, Yang KH, Mun JH. Mechanical Model for Shear Friction Capacity of Concrete at Construction Joints. Advances in Materials Science and Engineering. 2018. DOI: 10.1155/2018/9264503.
- [21] Urban T. Betonowe konstrukcje zespolone w świetle Eurokodu 2 z lat 2008 i 2023. Inżynieria i Budownictwo. 2024. DOI: 10.5604/01.3001.0054.8829.