

## Przyczepność betonu do zbrojenia sprężającego w elementach strunobetonowych – stan zagadnienia

### Bond stresses between concrete and prestressing in pre-tensioned elements – state of the art

**Słowa kluczowe:** adhezja, bezpieczeństwo, efekt Hoyer'a, przyczepność, strunobeton, tarcie, zazębienie mechaniczne

**Keywords:** adhesion, safety, Hoyer's effect, bond stress, pre-tensioned prestressed concrete, friction, mechanical interlocking

#### 1. Wprowadzenie

We współczesnym budownictwie technologia prefabrykacji betonowej ponownie zaczyna odgrywać ważną rolę. Przyczynia się ona do przyspieszenia procesu budowlanego, poprawy jakości obiektu, optymalnego wykorzystania właściwości poszczególnych materiałów, a także lepiej spełnia ograniczenia związane z szeroko rozumianą ochroną środowiska. Prefabrykacja znajduje zastosowanie nie tylko w realizacji obiektów użyteczności publicznej i budynków mieszkalnych, ale także w infrastrukturze drogowej i kolejowej. W prefabrykacji najłatwiej można stosować innowacyjne rozwiązania w budownictwie, w tym nowe mieszanki betonowe lub nowe rodzaje cięgien (7).

Obecnie możliwe staje się precyzyjne dopasowanie właściwości mechanicznych betonu do wymagań stawianych poszczególnym elementom. Duża wytrzymałość betonu, częstokroć przekraczająca 100 MPa, czy stosowanie betonu samozagęszczającego się nie jest niczym niespotykanym we współczesnych zakładach prefabrykacji. Dzięki komputerowo sterowanym procesom produkcyjnym istnieje duża łatwość dozowania wszelkich składników mieszanki betonowej dla danego wyrobu oraz formowania, zagęszczania i dojrzewania betonu w optymalnych warunkach. Rezultatem tych procesów technologicznych jest wyraźnie lepsza jakość betonu prefabrykowanego w stosunku do betonu układanego na placu budowy.

W konstrukcjach strunobetonowych stalowe zbrojenie sprężające może być wykonane z drutów gładkich lub profilowanych, prętów żebrowanych, a także ze splotów wielodrutowych – siedmiodrutowych lub trzydrutowych (3).

Przekazanie siły sprężającej na element strunobetonowy następuje przez więzy przyczepności betonu do zbrojenia. Dobre rozpoznanie zagadnienia przyczepności ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji. Dotyczy to szczególnie elementów strunobetonowych nie mających zbrojenia zwykłego, na przykład podkładów kolejowych lub stropowych płyt kanałowych.

#### 1. Introduction

In contemporary building engineering the technology of concrete prefabrication once more starts to play an important role. It contributes in acceleration of building process, improvement in the quality of objects, taking full advantage of applied materials properties and better answers to the limitations connected generally with widely understood nature preservation. Prefabrication is used not only for constructing public objects and housing buildings, but also for road and railway infrastructure. Within the frame of prefabrication most easily are implemented innovative solutions in building engineering, including introduction of new concrete mixes or new types of tendons (7).

In prefabrication it is possible to fit precisely concrete mechanical properties to the requirements set for particular elements. High concrete compressive strength, frequently exceeding 100 MPa, or application of self-compacting concrete is nothing unusual in modern prefabrication factories. Due to computer controlled production processes there exist high ease in dosage of all concrete mix components for specific product as well as in placing, compacting and maturation of concrete in optimal conditions. Higher quality of prefabricated concrete in comparison with monolithic is the final result of such technological processes.

For pre-tensioned prestressed concrete structures steel prestressing reinforcement may be prepared in the form of smooth or profiled wires, ribbed bars or multi-wire strands – always of seven or three-wires (3).

The transfer of the prestressing force to the pre-tensioned element takes place through the bond restraint between concrete and steel. Proper recognition of bond phenomenon directly influences the safety and durability of structure. It is especially important for pre-tensioned, prestressed concrete elements without the normal reinforcement, such as railway sleepers or hollow core floor slabs.

## 2. Przyczepność betonu do zbrojenia w konstrukcjach strunobetonowych

W konstrukcjach z betonu zbrojonego współpraca betonu i stali zbrojeniowej jest możliwa dzięki zbliżonej rozszerzalności termicznej stali i betonu oraz dzięki więzom przyczepności, powodującym jednakowe odkształcenia stali  $\epsilon_s$  i betonu  $\epsilon_c$  na powierzchni kontaktu.

Ogólnie przyczepnością nazywamy zespół czynników zabezpieczających przerwanie kontaktu między materiałami. Najważniejszymi są: adhezja, siły tarcia oraz mechaniczne zazębianie nierówności poboczniczy zbrojenia o beton (18, 19). W konstrukcjach strunobetonowych przyczepność zbrojenia stalowego poddanego wstępnym naprężeniom w strefie transmisji siły sprężającej jest dodatkowo powiększona o składową wywołaną mechanizmem klinowania się cięgna, tak zwanym efektem Hoyera.

### 2.1. Adhezja

Siły adhezji opisują więź między cząstkami różnych materiałów na poziomie molekularnym. Występują one w strefie przejściowej beton - stal. Siły adhezji są sumą adhezji chemicznej i fizycznej oraz wzajemnego blokowania się ziaren cementu i mikroskopijnie szorstkiej powierzchni wkładki zbrojeniowej. Wartość przyciągania powierzchniowego jest bardzo mała, a jego wkład w naprężenia przyczepności ustaje w chwili pojawienia się pierwszego zarysowania w strefie przejściowej materiałów. W rozważaniach inżynierskich wpływ samej adhezji na przyczepność często jest zaniedbywany, ponieważ przyczepność zbrojenia do betonu wynikająca z adhezji osiąga wartości nieprzekraczające 1 MPa.

### 2.2. Tarcie

Tarcie wewnętrzne jest podstawowym zjawiskiem fizycznym mającym wpływ na naprężenie przyczepności (26). Jest to opór przeciwdziałający równoległemu przemieszczeniu dwóch powierzchni utrzymywanych w bezpośrednim kontakcie przez siłę prostopadłą do kierunku działania siły przemieszczającej. Powierzchnia, wzdłuż której następuje poślizg dla bardzo gładkich powierzchni znajduje się na granicy strefy przejściowej stal – beton, a dla bardziej szorstkich powierzchni przebiega poprzez warstwę cementu (35). Siły tarcia na styku betonu i stali wywołane są skurczem dojrzewającej mieszanki betonowej w czasie wiązania i twardnienia betonu. Odkształcenie skurczowe betonu powoduje powstanie normalnego naprężenia na powierzchni kontaktu – radialnego naprężenia ściskającego do osi podłużnej zbrojenia. Naprężenie to powoduje zmianę naprężenia w stali oraz poprzeczną deformację, co następnie powoduje radialne przemieszczenie powierzchni kontaktowej.

### 2.3. Zazębianie mechaniczne

Mechanizm zazębiania jest wywołany ukształtowaniem poboczniczy wkładki zbrojeniowej powodującym mechaniczne blokowanie się zbrojenia o dyble uformowane z betonu, wzdłuż powierzchni bocznej cięgna. W przypadku prętów efekt ten wiąże się z ich zębrowaniem, dla drutów przez nagniatanie lub inne formy profi-

## 2. Bond between concrete and reinforcement in pre-tensioned, prestressed concrete structures

In reinforced concrete structures the cooperation between concrete and reinforcing steel is possible due to similar thermal elongation of both materials and thanks to bond restraints, resulting in equal strains of the steel  $\epsilon_s$  and concrete  $\epsilon_c$  on the contact surface.

Bond is generally described as the set of factors preventing the breaking-off the contact between materials. The most significant factors are the following: adhesion, friction forces and mechanical interlock of reinforcement peripheral roughness and surrounding concrete (18, 19). In pre-tensioned structures, within the transmission zone of the prestressing force, bond stress for steel tendons is additionally increased by the component produced by tendons wedging mechanism, called Hoyer's effect.

### 2.1. Adhesion

Adhesion forces describes the connection between particles of different materials on molecular level. They occur on the contact zone between phases: concrete and steel. Adhesion forces are the sum of chemical and physical adhesion as well as mutual blocking of cement particles and microscopically rough surface of reinforcing inset. The value of surface attraction is small and its contribution to bond stress vanishes at the moment of the first crack appearance on materials surface contact. For engineering discussions the sole influence of adhesion is often negligible as the value of bond stress resulted from adhesion does not exceed 1 MPa.

### 2.2. Friction

The inner friction is the basic physical phenomenon influencing the bond stresses (26). Friction is defined as resistance to parallel displacement of two surfaces being in the direct contact, produced by the force perpendicular to direction of the applied force. The surface along which the slippage occurs is located on the boundary between steel and concrete for very smooth surfaces or runs through cement layer for more rough surfaces (35). Friction forces on the contact between concrete and steel result from shrinkage of curing concrete mix and hardening process. Shrinkage strain of concrete produces the normal stress at the contact surface – radial compressive stress perpendicular to the reinforcement longitudinal axis. This stress causes the change of stress state in the reinforcement and its transverse deformation, which finally results in radial displacement of the contact surface.

### 2.3. Mechanical interlocking

Mechanism of interlock is evoked by the shaping of reinforcing inset's periphery, resulting in mechanical blockage of steel at dowels formed from concrete along the tendons side surface. For bars this effect is produced by ribs at the surface, for wires by pressing or applying other forms of profiling and for strands – by spiral wires torsion. Presently, in production of pre-tensioned concrete elements smooth bars are rarely used, if only in the case

lowania, a w przypadku splotów przez spiralne skręcenie drutów. Obecnie w konstrukcjach strunobetonowych pręty gładkie stosuje się bardzo rzadko, jedynie w przypadku dodatkowych kotwień mechanicznych.

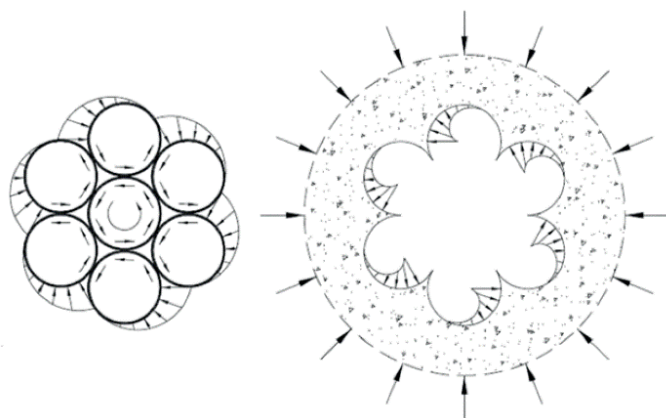
Zależności naprężenia przyczepności do poślizgu zbrojenia są różne dla drutu gładkiego, pręta żebrowanego i splotu siedmiodrutowego – co pokazano na rysunku 1. W przypadku drutów gładkich, po przekroczeniu niewielkiej wartości poślizgu przyczepność spada, natomiast w przypadku splotów pozostaje stała lub nawet rośnie.

Podczas rozciągania splotu, po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości wiązania, zaczynają powstawać zarysowania betonowych klinów powstałych w zagłębieniach cięgien, w wyniku czego pojawia się poślizg. Poślizg ten jest później częściowo powstrzymany przez blokowanie się kolejnych klinów betonowych. To powoduje, że powszechnie przyjmowane w projektowaniu założenie równomiernego rozkładu naprężenia przyczepności na długości zakotwienia w chwili zniszczenia jest bliskie do rzeczywistego stanu, a jednocześnie znacznie upraszcza ono obliczenia.

W chwili przekazywania siły sprężającej na beton splot ma tendencję do przemieszczania się w głąb betonu czyli doznaje poślizgu do jego wnętrza. Zewnętrzne druty starają się rozkręcać jednak napotykają na opór. Splot ulega deformacji, która powoduje powstanie momentu skręcającego, równoważonego przez naprężenia kontaktowe wzdłuż obwodu [rysunek 2] (8).

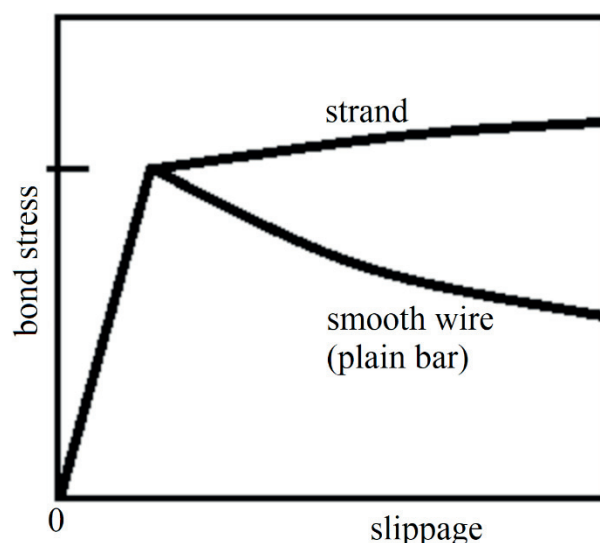
#### 2.4. Efekt Hoyerera

Mechanizm klina występuje jedynie w przypadku konstrukcji strunobetonowych, to jest gdy zbrojenie poddane jest wstępnemu rozciąganiu, jeszcze przed zabetonowaniem elementu. Na skutek wprowadzenia siły rozciągającej, ciężko zmniejsza swoją średnicę i pole powierzchni przekroju poprzecznego o wielkość wynikającą z wartości współczynnika Poissona. Po jego zabetonowaniu, w chwili zwolnienia naciągu, a więc przekazania siły sprężającej na beton, zbrojenie wykazuje tendencję do powrotu do pierwotnego kształtu. Stwardniały beton otaczający ciężko ogranicza ich poprzeczne odkształcenie, co generuje powstanie ściskających sił



Rys. 2. Schemat ząbkowania mechanicznego splotu sprężającego (1).

Fig. 2. Peculiarity of mechanical interlocking for pre-stressing strand (1).



Rys. 1. Ideowa zależność naprężenia przyczepności od poślizgu (15)

Fig. 1. Idealized relationship between bond stress and slippage (15).

of additional mechanical anchorages.

Relationship between bond stress and reinforcement slippage are different for smooth wire, for ribbed bar and seven-wire strand – see: Fig.1. For smooth wires after exceeding low slippage value the bond stress is reduced, but for strands it remains constant or even increase.

While strand tensioning, after reaching the maximum joint strength, cracking of concrete dowels formed within the tendons recesses takes place, which finally results in slippage of the tendon. This slippage is then partially restrained by blockage of the subsequent concrete dowels. This causes that the assumption commonly assumed in a design of an even distribution of the bond stress on the anchorage length at the moment of failure is close to the actual condition and at the same time it significantly simplifies the calculations.

At the time of transferring the pre-stressing force to concrete, strands have a tendency to move inside the concrete [sliding into]. Strand's external wires while trying to untwist, encounter resistance. Strand's deformation resulting in producing torsion moment balanced by contact stresses along the periphery [Fig. 2] (8).

#### 2.4. Hoyer's effect

Wedge mechanism occurs only for pre-tensioned prestressed concrete structures, i.e. when the reinforcement is subjected to pre-tensioning before concreting process of the element. Due to introduction of tensile force, tendon reduces its diameter and transversal cross-section area by value resulting from the Poisson's ratio. After concreting the element, at the moment of tensioning release [transfer of loads to the concrete] reinforcement is trying to regain its initial shape. Hardened concrete surrounding tendons restrains their transverse strains [expansion], which generates compressive normal force on the tendons peripheral [radial to axis].

normalnych do pobocznicy ciągnięć – radialnych do osi. W efekcie powstają dodatkowe siły tarcia wzdłuż osi ciągnięcia. Powstałe siły tarcia są skierowane przeciwnie do sił wymuszających przemieszczenie stali względem betonu. Zjawisko to pierwszy opisał Hoyer w 1939 roku (30), który badał zachowanie betonu sprężonego gładką struną fortepianową, o bardzo małej średnicy. Efekt Hoyera jest również nazywany „mechanizmem klina”. W przypadku splotów wielodrutowych mechanizm ten jest o wiele bardziej złożony, ponieważ obejmuje interakcję wzajemnych efektów Hoyera zachodzących zarówno pomiędzy poszczególnymi drutami, jak również między zewnętrznymi drutami a betonem. Zjawisko Hoyera dla splotów wielodrutowych nie jest jeszcze dobrze rozpoznane i wymaga kontynuowania badań.

### 3. Czynniki wpływające na przyczepność

Ponieważ przyczepność jest zjawiskiem złożonym, to na jej wielkość i rozkład wzdłuż długości wkładki zbrojeniowej wpływ ma bardzo wiele czynników. Najważniejsze są następujące.

#### – Usytuowanie zbrojenia w przekroju elementu

Wpływ rozstawu, otulenia i skrupowania betonem był przedmiotem wielu prac badawczych. Podstawowym czynnikiem jest zapewnienie odpowiedniej otuliny betonowej. Przy niewielkiej otulinie, o wymiarze mniejszym od trzech średnic pręta zbrojeniowego, zniszczenie przyczepności następuje przez rozłupanie. W przypadku otuliny o iększej grubości pojawia się mechanizm zniszczenia związany ze ścięciem betonu w sąsiedztwie czoła żeber i wyrwaniu pręta z betonu (12).

Ponadto dla zapewnienia dobrej przyczepności zbrojenia do betonu należy zapewnić prawidłowe rozmieszczenie zbrojenia w elemencie, to jest zachować minimalne, graniczne odległości pomiędzy wkładkami zbrojeniowymi. Najnowsze doświadczenia potwierdzają, że dla elementów strunobetonowych, sprężanych przy użyciu splotów siedmiodrutowych o średnicy 12,7 mm rozstaw ciągnięć nie powinien być mniejszy niż 40 mm, natomiast dla splotów o średnicy 15,2 mm nie mniejszy od 50 mm.

W praktyce projektowej różnicuje się przyczepność wkładek zbrojeniowych w zależności od ich położenia, w trakcie betonowania. Według EN 1992-1-1:2008 (14) zbrojenie w elementach betonowych o wysokości nie przekraczającej 250 mm oraz dolnych i środkowych częściach przekrojów o większych wysokościach ma dobre warunki do zapewnienia przyczepności, natomiast to położone w górnej powierzchni elementu o wysokości większej od 250 mm cechuje się słabymi warunkami przyczepności.

#### – Wytrzymałość betonu na ściskanie

Badania doświadczalne pokazują wyraźną zależność wzrostu przyczepności w miarę zastosowania betonu wyższej klasy (23). Pierwsze ważne badania dotyczące wpływu wytrzymałości betonu, przeprowadzone już w 1963 roku (21), nie wykazały znaczącego wpływu wytrzymałości betonu na długość transmisji

As a result, additional friction forces along the tendon are produced with the direction opposite to forces imposing the displacement of steel in relation to concrete. This effect was firstly identified by Hoyer in 1939 (30), who investigated the behaviour of concrete prestressed with small diameter smooth piano string. For multi-wire strands this mechanism is more complex as it involves the interaction of mutual Hoyer's effect occurred not only between the particular wires, but also for external wires and concrete. Hoyer's effect for multi-wire strands is still not well recognized and required further investigations.

### 3. Parameters influencing bond stress

As bond constitutes a complex effect, its magnitude and distribution along the length of reinforcement is influenced by numerous factors. Most significant parameters are listed and described below.

#### – Location and arrangement of reinforcement in cross-section

The influence of reinforcement distances, concrete cover and restraints, were the subject of many research. The basic issue is assuring the proper concrete cover to reinforcement. For relatively small cover, not exceeding the value of triple bar diameter, bond failure takes place through splitting. For higher values of concrete cover, the failure mechanism connected with concrete shear in the vicinity of the rib faces and pulling off the bar from concrete (12) appears.

Moreover, for assuring the good conditions for reinforcement bond to concrete, there should be guaranteed appropriate arrangement of reinforcement within the element, i.e. minimum limit distances between reinforcing bars. Present investigations prove that for pre-tensioned concrete elements, prestressed with seven-wire tendons with diameter 12,7 mm the distance between tendons ought to be not smaller than 40 mm, while for tendons with diameter 15,2 mm – not smaller than 50 mm.

In design practice, reinforcement bond characteristics are distinguished depending on the location while casting the element. According to (14), reinforcement placed in elements with height not exceeding 250 mm as well as in lower and middle parts of cross-sections with bigger heights exhibits good bond conditions, while the one located close to the upper surface of the element with the height exceeding 250 mm is characterized by weak bond conditions.

#### – Concrete compressive strength

Experimental investigations indicate the clear dependence between bond increase and concrete strength class (23). First significant tests on the influence of concrete strength, conducted in 1963 (21), did not show the meaningful effect of this parameter onto prestressing force transmission length for strands, but within these tests there were analyzed concretes with the compressive strength only up to 35 MPa. Further investigations indicated clearly the influence of compressive concrete strength onto bond stress (2, 6, 24, 25, 36). Tests carried out at the Cracow University of Technology, wi-

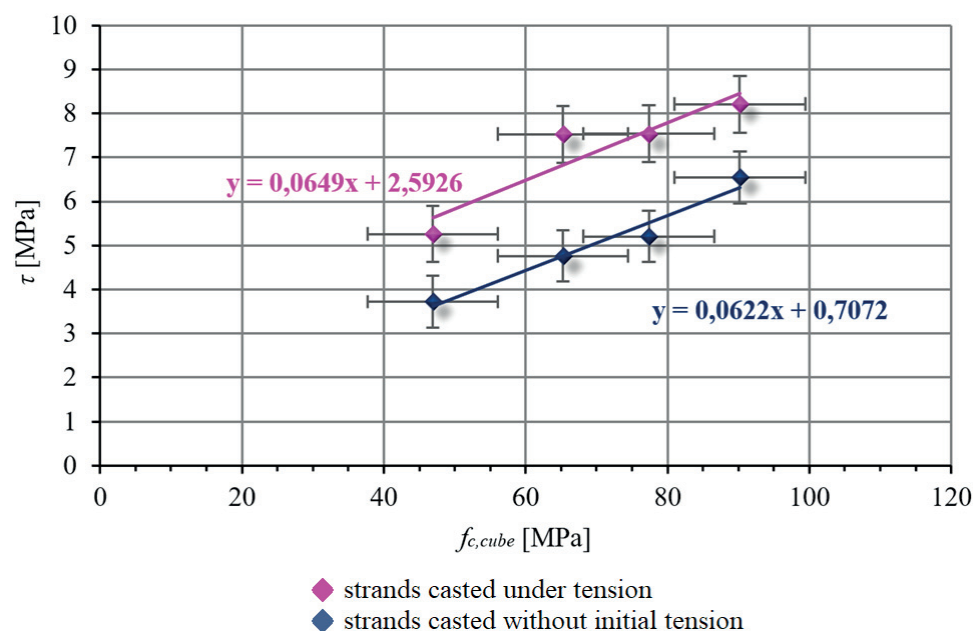


siły sprężającej w splotach, ale analizowano w nich tylko betony o wytrzymałości do 35 MPa. Późniejsze wyniki badań wskazywały już na wyraźny wpływ wytrzymałości betonu na ściskanie (2, 6, 24, 25, 36). Badania wykonane w Politechnice Krakowskiej w latach 2012-2014 dotyczące betonów wysokowartościowych potwierdziły, iż naprężenie przyczepności jest ściśle związane z wytrzymałością i wiekiem betonu (11, 13, 33). Stwierdzono liniową korelację wytrzymałości betonu na ściskanie i naprężenia przyczepności w betonach z kruszyw bazaltowych. Badania przeprowadzone w Politechnice Krakowskiej obejmowały między innymi określenie przyczepności betonu do splotów sprężających zabetonowanych bez naciągu oraz pod naciągiem w betonach z kruszyw bazaltowych (11, 32). Wykazano wzrost naprężenia przyczepności o blisko 2 MPa dla splotów zabetonowanych pod naciągiem – wpływ efektu Hoyera [rysunek 3]. Stwierdzono również duży wzrost przyczepności, związany ze stosowaniem betonów wyższych klas oraz podano inżynierską zależność wiążącą przyczepność z wytrzymałością betonu na ściskanie [rysunek 3].

Do określania stanów granicznych nośności [SGN] i użyteczności [SGU] w strefie przypodporowej można wyliczyć naprężenie przyczepności betonu do splotów siedmiodrutowych bezpośrednio w oparciu o wytrzymałość betonu na ściskanie określoną na kostkach  $15 \times 15 \times 15$  cm ze wzoru  $f_{bpt} = f_{c,cube}(t) \cdot 0,06 + 2,5$  MPa, gdzie  $f_{c,cube}(t)$  oznacza wytrzymałość na ściskanie w chwili zwolnienia naciągu. Takie uproszczenie jest szczególnie przydatne w analizie konstrukcji strunobetonowych, gdy doświadczalne określenie wytrzymałości betonu na osiowe rozciąganie, w chwili zwolnienia naciągu jest utrudnione.

#### – Stosowanie betonów innych niż betony zwykłe

Stosowanie betonu samozagęszczającego się lub betonu lekkiego powoduje wydłużenie długości transmisji w przypadku betonów



Rys. 3. Naprężenie przyczepności betonu do splotów sprężających w funkcji wytrzymałości betonu na ściskanie – wyniki doświadczalne

Fig. 3. Experimental results of bond between concrete and prestressing strands as a function of concrete compressive strength

thin the years 2012-2014, for high strength concretes proved that bond stress is tightly connected with compressive strength and the age of concrete (11, 13, 33). Almost linear correlation between concrete compressive strength and bond stress for concretes made on basalt aggregate was observed. The research carried out at the Cracow University of Technology covered ia. determination of bond of concrete to prestressing strands casted without initial tensioning and under tension for concretes made on basalt aggregate (11, 32). An increase in a bond stress by nearly 2 MPa for strands casted under tension was demonstrated - impact of the Hoyer effect [Fig. 3]. There was also a significant increase in bond associated with the use of higher strength classes of concrete. An engineering formula that linked bond with compressive strength of concrete [Fig. 3] was given.

To determine the ultimate and serviceability limit states in the support zone, bond stress between concrete and seven-wire strand can be calculated directly with using the compressive strength of concrete determined on cubic samples [ $15 \times 15 \times 15$  cm], based on a formula:  $f_{bpt} = f_{c,cube}(t) \cdot 0,06 + 2,5$  MPa, where  $f_{c,cube}(t)$  indicates the compressive strength of concrete at the moment of prestressing force release. This simplification is particularly useful in an analysis of pre-tensioned concrete elements, when the experimental determination of the axial tensile strength of concrete at release is difficult.

#### – Application of concretes different than normal ones

Usage of self-compacting or light-weight concrete results in elongation of transmission length in comparison with normal concretes. Reducing the bond between reinforcement and self-compacting concrete was the subject of tests presented by Peterman in (29). Possible reason for such effect may be the increase in fluidity and application of chemical admixtures reducing the mix viscosity. Tests

results included in (13) indicated significant influence of silica fume contents in concrete as well as ratio between silica fume and super-plasticizer onto the rigidity of connection between concrete and reinforcement. Bentur and Cohen (4) noted that the presence of silica fume causes a significant reduction in porosity and improves the structure of the pores. Monteiro and Mehta (34) have shown experimentally that increasing the proportion of silica fume in relation to the weight of cement improves the bond of concrete to reinforcement.

#### – Type of prestressing strands

A wide experimental research program carried out at the Cracow University of Technology (28) took into account also the influence of the diameter of the prestressing strand on the bond stresses. The distributions of average values of

zwykłych. Zmniejszenie przyczepności zbrojenia do betonów samozagęszczających się było przedmiotem badań (29). Prawdopodobną przyczyną takiej zależności jest zwiększenie ciekłości i stosowanie domieszek chemicznych powodujących obniżenie lepkości plastycznej mieszanki betonowej. Badania (13) wykazały znaczny wpływ zawartości pyłu krzemionkowego w betonie oraz proporcji między tą zawartością, obejmującą także superplastyfikator, na sztywność połączenia beton – stal. Bentur i Cohen (4) stwierdzili, że dodatek pyłu krzemionkowego powoduje bardzo duże zmniejszenie porowatości oraz poprawia strukturę porów. Monteiro i Mehta (34) wykazali doświadczalnie, że zwiększanie udziału pyłu krzemionkowego w stosunku do masy cementu poprawia przyczepność betonu do zbrojenia.

#### – Rodzaj splotów sprężających

Szeroki program doświadczeń, prowadzonych w Politechnice Krakowskiej (28) uwzględniał również wpływ średnicy splotu sprężającego na naprężenia przyczepności. Na rysunku 4 pokazano rozkłady średnich naprężeń przyczepności BWW do splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm bez naciągu oraz 7φ5 mm z naciągiem [oznaczenie (N) na rysunku 4]. Doświadczenia te wykazały dużą różnicę rzeczywistych naprężeń przyczepności dla splotów 7φ4 mm i 7φ5 mm, czego nie uwzględniają żadne z obowiązujących norm projektowych - we wzorach na długość transmisji i długość zakotwienia cięgien sprężających proponuje się jednakowy współczynnik dla wszystkich splotów 7-drutowych.

#### – Jakość powierzchni splotu

Jakość powierzchni splotu znacznie wpływa na przyczepność tarcia. Większą przyczepność i krótsze długości transmisji mają sploty skorodowane niż z niezmienionej stali. Ponieważ korozja stali sprężającej jest bardzo niepożądana, zaczęto produkować sploty chronione powłokami epoksydowymi. Tak zabezpieczone sploty wykazują mniejsze naprężenia przyczepności, wywołujące większe długości transmisji.

#### – Technologia zwalniania naciągu

Siła sprężająca może być przekazywana na beton elementu konstrukcyjnego stopniowo lub nagle. Powolne i stopniowe zwalnianie urządzeń naciągowych pozwala na rozwinięcie krótszych długości transmisji siły niż w przypadku nagłego zwolnienia. Kaar i inni (22) jako pierwsi stwierdzili i opisali to zjawisko. Różnica ta wynosi od 20% do 30% wzrostu długości transmisji od strony czynnej względem strony biernej. Późniejsze badania potwierdzały wyznaczoną tendencję - wzrost długości transmisji przy nagłym zwolnieniu naciągu wynosił od 20 do 35% (6, 27, 31).

the HPC bond to the 7φ 4 mm and 7φ 5 mm strands without tension and 7φ 5 mm under the tension [designation (N) in Figure 4] is presented in Fig. 4. These tests showed a significant difference between the actual adhesion stress values obtained for the 7φ 4 mm and 7φ 5 mm strands, which are not included in any of the applicable design standards - in the formulas for the transmission length and the development length, the same coefficient for all 7-wire strands is proposed.

#### – Strands surface quality

The quality of strand's surface significantly influences the friction bond. Corroded strands exhibit higher bond stress values and shorter transmission length than those from the new series. As the corrosion of prestressing steel is highly undesirable, strands covered with epoxy layers were started to be produced. Such protected strands indicate lower bond stress resulting in longer transmission length.

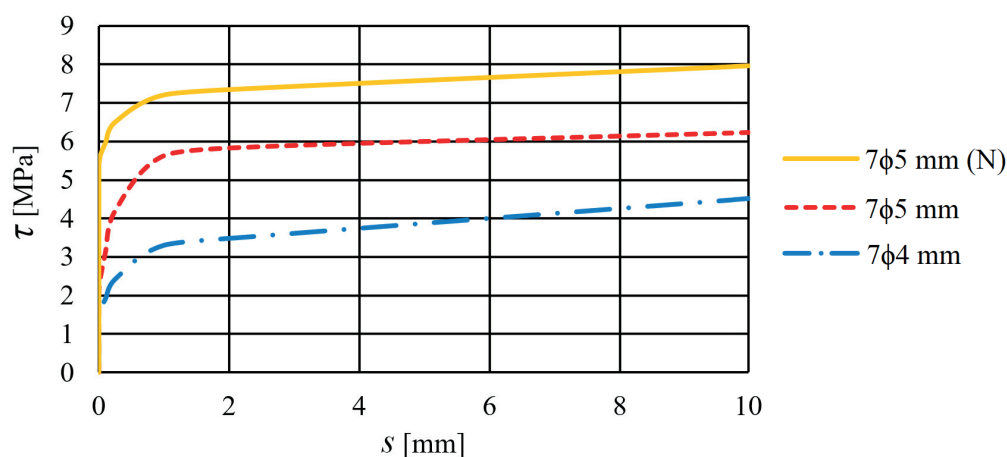
#### – Prestress release technology

Prestressing force can be transferred to concrete of structural element in a gradual or sudden manner. Slow and gradual release of prestressing force makes it possible to develop the shorter transmission length then for the case of sudden force release. This effect was observed and described for the first time by Kaar (22) – tests results showed the 20% ÷ 30% increase in transmission length at the active side in relation to the one at the passive side. Further research proved this trend – measured increases in transmission length for gradual force release were within the 20% ÷ 35% (6, 27, 31).

## 5. Anchorage zone in pre-tensioned concrete elements

### 5.1. Bond stress development on the tendon's length

In typical pre-tensioned prestressed concrete structures the total transfer of prestressing force to concrete takes place on section



Rys. 4. Naprężenie przyczepności betonu do splotów sprężających (32)

Fig. 4. Bond stress between concrete and prestressing strands (32)

## 5. Strefa zakotwienia cięgien w strunobetonie

### 5.1. Rozwój przyczepności na długości cięgna

W klasycznych konstrukcjach strunobetonowych pełne przekazanie siły sprężającej na beton następuje na odcinku o długości  $l_{pt}$ , nazywanym długością transmisji. Poza odcinkiem transmisji naprężenia ściskające od sprężenia sukcesywnie rozprzestrzeniają się na cały przekrój elementu i przyjmuje się, że rozkład liniowy tych naprężeń występuje dopiero w przekroju oddalonym od czoła elementu o  $l_{disp}$ , zwanym „długością dyspersji”.

Długość tych odcinków zależy głównie od naprężenia przyczepności betonu do stali. Długość transmisji siły sprężającej i zakotwienia splotów rośnie także wraz ze wzrostem wstępnego naprężenia w stali – zostało to potwierdzone doświadczalnie (3, 21, 31, 34).

Hegger i Bertram (17) w 2010 roku zaproponowali model rozwoju przyczepności na długości transmisji – graficznie został on przedstawiony na rysunku 5. Naprężenia przyczepności na długości transmisji nie są stałe, ich wartość w pewnym punkcie wynika z sumy naprężeń adhezji i tarcia, a także zazębienia mechanicznego. Ponieważ udział efektu Hoyera i pozostałej siły sprężającej zmienia się wzdłuż długości transmisji, wyróżnia się cztery obszary tej siły:

- obszar brzegowy (a) - różnica naprężeń stali i betonu jest tutaj maksymalna, występuje duże parcie poprzeczne i maksymalne naprężenie przyczepności, w wyniku poślizgu końcowego 1÷2 mm ulega aktywacji największa część wytrzymałości zwiększając przyczepność, co wynika z efektu Hoyera;
- obszar środkowy (b) - siła sprężająca została już częściowo przekazana przez stal na beton. Stan równowagi sił przy przekazywaniu sprężenia powoduje mniejsze parcie poprzeczne i mniejszy poślizg, zatem składowa przyczepności zależna od naprężeń oraz składowa zależna od poślizgu znoszą się;
- obszar końcowy (c) - przekazywana jest już bardzo mała siła, parcie poprzeczne splotu jest minimalne i w związku z tym też część zależna od naprężeń jest mała. Występuje niewielki poślizg;
- obszar poza długością transmisji (d) - panuje równowaga sił bez dalszego przekazywania siły sprężającej, a więzy przyczepności bez udziału parcia poprzecznego są wystarczające. Bez dodatkowych obciążeń zewnętrznych nie występuje poślizg.

### 5.2. Zarysowania betonu w strefie zakotwienia

Przekazywanie siły sprężającej na beton strefy czołowej elementu strunobetonowego powoduje powstanie złożonego, przestrzennego stanu naprężeń, składającego się z podłużnych strumieni naprężeń ściskających beton oraz poprzecznych naprężeń rozciągających. Model Code 2010 (16) definiuje trzy różne rodzaje zarysowań w tej strefie, w elemencie strunobetonowym, które mogą mieć duży wpływ na prawidłowe zakotwienie cięgien w betonie. Są one astępujące:

with the length equal to  $l_{pt}$ , defined as transmission length. Outside this section compressive stresses from prestress are successively spread out on the whole element's cross-section and it is assumed that linear distribution of these stresses takes place for the cross-section at the distance  $l_{disp}$  [dispersion length], measured from the face of the element.

Lengths of the mentioned sections depends decisively of the bond stress value between concrete and steel. Prestressing force transmission length and strands anchorage increase also with the initial stress in steel, what was proved in (3, 21, 31, 34).

In 2010 Hegger and Bertram (17) proposed the model for bond stress development on transmission length – its graphical representation is shown in Fig. 5. Bond stresses on transmission length are not constant, their local value results from the sum of stresses from adhesion, friction and mechanical interlock. As the participation of Hoyer's effect and the rest of prestressing force on transmission length vary, there are introduced the four regions for the force introduction:

- border region (a) – the biggest difference between stresses in steel and concrete, high transverse pressure and maximum bond stress exist there. As a result of the final slippage of 1÷2 mm the biggest part of bond strength is activated [caused by Hoyer's effect];
- middle region (b) – prestressing force has partially been transferred from steel to concrete. Force equilibrium state at prestress transfer results in lower transverse pressure and smaller slippage. Hence, the bond components depending on stress and slippage are reduced;
- final region (c) – very small force is being transferred, transverse pressure of strand is minimal and consequently the part depending on stresses is low; slight slippage occurs;
- region outside the transmission length (d) – force equilibrium is reached without further participation of prestressing force and bond restraints without transverse pressure are sufficient; without additional external loads there is no slippage.

### 5.2. Concrete cracking within anchorage zone

Transfer of prestressing force to the concrete in close-to-face zone of pre-tensioned concrete element results in the creation of complex, spatial stress state, including longitudinal compressive stress and transverse tensile stresses in concrete. Model Code 2010 (16) defines three different types of close-to-face zone cracking in pre-tensioned element that may have a significant effect on the proper anchorage of tendons in concrete:

- bursting off the element generated by transverse tensile stresses in concrete. Example of such failure mode for mono-block pre-tensioned prestressed concrete railway sleeper is presented in Fig. 6;
- spalling off in the end zones of the element, especially for thin-walled elements – example of spalling mode for the face of pre-tensioned hollow core floor slab is given in Fig. 7;

- rozrywanie elementu generowane przez poprzeczne naprężenia rozciągające w betonie. Przykładowe rozrywanie czoła strunobetonowego, monoblokowego podkładu kolejowego pokazano na rysunku 6;
- rozluźnianie w końcowych strefach elementów, szczególnie cienkościennych - przykładowe rozluźnianie czoła strunobetonowej, kanałowej płyty stropowej pokazano na rysunku 7;
- rozszczepianie zachodzące wzdłuż powierzchni kontaktowej cięgien, a także betonu, będące głównie wynikiem efektu Hoyera. Rozszczepienie czoła podrozjazdnicy kolejowej sprężonej pojedynczymi drutami pokazano na rysunku 8, a na rysunku 9 widoczne jest rozszczepienie płyty stropowej połączone z dużym, kilkumilimetrowym poślizgiem splotu sprężającego.

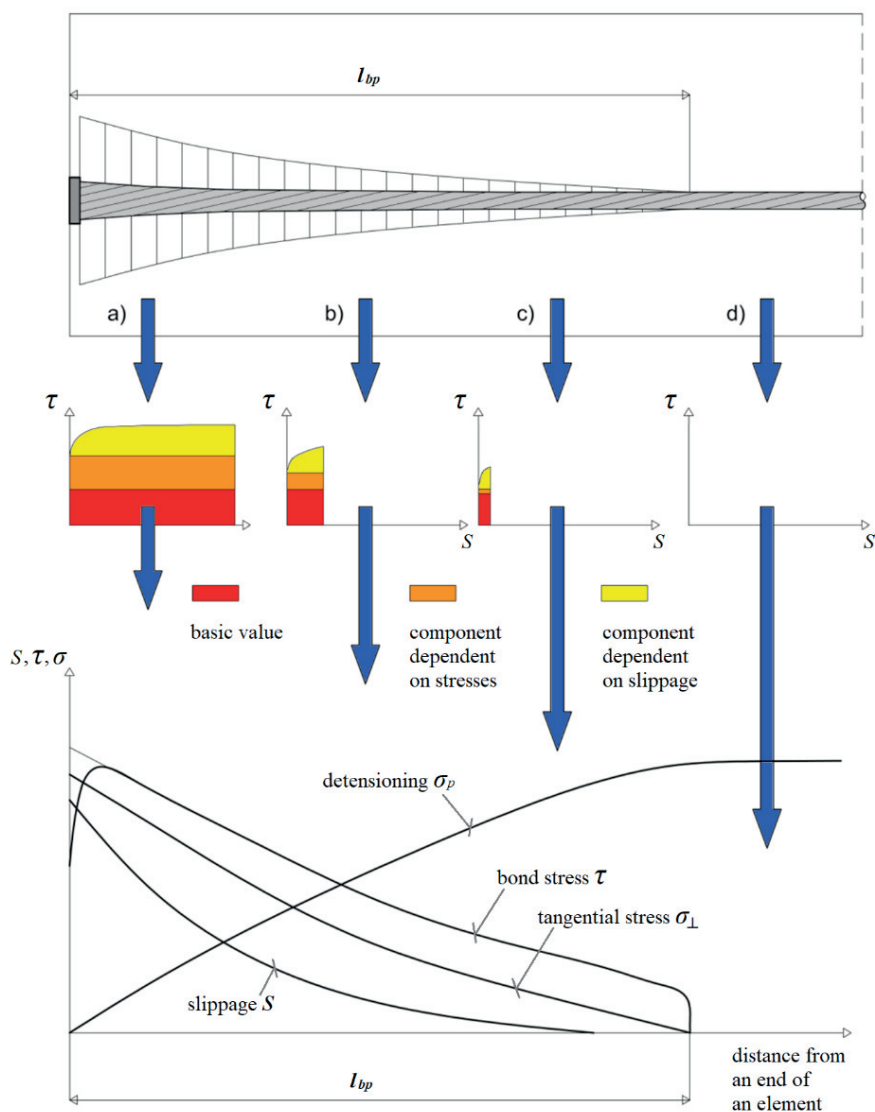
Bardzo często opisane zjawiska nakładają się wzajemnie, a ich łączny efekt nie tylko zmniejsza trwałość, ale i może prowadzić do utraty nośności elementu.

W przypadku podkładów czy podrozjazdnic kolejowych, długość transmisji jest podstawowym problemem projektowym, ponieważ bardzo silnie wyężona strefa podszynowa znajduje się stosunkowo blisko czoła elementu. Rozszczepienie czoła powoduje znaczne wydłużenie długości transmisji, a przez to zmniejszenie odporności na powstawanie rys i na nośność przekroju podszynowego.

W strunobetonowych płytach kanałowych, nieposiadających żadnego zbrojenia poprzecznego, głównym kryterium jest zdolność przenoszenia sił poprzecznych w strefach przy podporach – pojawienie się pierwszej rysy ukośnej przyjmuje się jako utratę nośności (10). Uszkodzenia strefy czołowej prefabrykatu, spowodowane naprężeniami rozłupującymi lub rozszczepiającymi, powodują zmniejszenie korzystnego efektu sprężenia, przyczyniając się do zmniejszenia odporności na ścinanie.

### 5.3. Kotwienie mechaniczne cięgien w strunobetonie

W przypadku, kiedy korzystna jest zmiana rozkładu naprężeń w strefie czołowej prefabrykatu strunobetonowego możliwe jest zmniejszenie lub usunięcie transmisji siły sprężającej, dzięki zastosowaniu dodatkowych elementów oporowych, montowanych do cięgien. Jeśli zastosuje się elementy oporowe o powierzchni, która wyklucza wystąpienie bezpośrednio pod nimi siły przekraczającej wytrzymałość betonu na ściskanie i będą one odpowiednio połączone z cięgnami, to można przyjąć, że długość transmisji zmniejszona zostanie do zera. Dodatkowe kotwienie sporadycznie stosowane w stropodachowych dźwigarach strunobetonowych, w których potrzebne jest utrzymanie siły sprężającej w strefie podporowej.



Rys. 5. Składowe przyczepności wzdłuż długości transmisji (17)

Fig. 5. Components of bond on transmission length (17)

- splitting appeared along the contact surface between tendons and concrete resulted mainly from Hoyer's effect. Such effect for pre-tensioned railway bearer with single wires is presented in Fig. 8, while in Fig. 9 there is visible rifting for floor slab connected with relatively high [few millimeters] prestressing tendon slippage.

Quite frequently, described phenomena act mutually and their joint effect not only reduces durability, but also may lead to the loss of element's load-bearing capacity.

For railway sleepers and bearers, value of transmission length is the crucial design aspect as the highly stressed rail zone is located relatively close to the face of the element.

Splitting off the face causes significant elongation of transmission length and by this – reduction of crack-resistance and load-bearing capacity of the element.





Rys. 6. Rozrywanie strunobetonowego podkładu kolejowego  
Fig. 6. Bursting in the pre-tensioned concrete railway sleeperj



Rys. 8. Rozszczepienie podrozdznicy kolejowej, sprężonej drutami  
Fig. 8. Splitting for railway bearer prestressed with wires



Rys. 7. Rozłupywanie czoła kanałowej płyty stropowej  
Fig. 7. Spalling at the face of hollowed floor slab



Rys. 9. Rozszczepienie płyty kanałowej, sprężonej splotami  
Fig. 9. Splitting at the hollow core floor slab prestressed with strands

Takie kotwienie jest również stosowane w strunobetonowych, monoblokowych podkładach kolejowych (28). Najczęściej w kotwieniu mechanicznych stosuje się następujące rozwiązania:

- instalowanie na gwintowanych końcówkach prętów sprężających niewielkich stalowych tarczek kotwiących; wówczas siła sprężająca przekazywana jest na beton zarówno poprzez więzy przyczepności, a także przez docisk tarczki do betonu lub kielichów kotwiących o stosunkowo dużej średnicy – w tym ostatnim przypadku siła przekazywana jest na beton wyłącznie przez opór kielichów kotwiących;
- zastosowanie technologii kotwienia BBRV – gładkie druty z rozszerzonymi końcówkami w postaci główek – kotwione w masywnych płytach stalowych.

Poprawność stosowania mechanicznych kotwień w strunobetonowych podkładach kolejowych potwierdzona została doświadczalnie w Politechnice Krakowskiej (9). W doświadczeniach tych wykazano większą nośność zarówno pod obciążeniami statycznymi, dynamicznymi jak i zmęczeniowymi.

## 6. Podsumowanie

Przyczepność zbrojenia stalowego do betonu jest podstawą prawidłowej pracy konstrukcji żelbetowych oraz strunobetonowych. W stanach granicznych nośności przyczepność jest niezbędna w celu kotwienia zbrojenia oraz wpływa na zdolność obrotu ewentualnych przegubów plastycznych. W analizie stanów granicznych użyteczności wpływa ona na szerokość rozwarcia i rozstawu rys oraz na ugięcia, a zatem decyduje o trwałości konstrukcji.

In pre-tensioned hollow core slabs, which hasn't transverse reinforcement, the major design criterion is the ability to carry transverse forces within the support zones – occurring the first diagonal crack is identified with the loss of load-bearing capacity (10). Damages of close-to-face zone of prefabricated element, caused by splitting or rifting stresses, result in the reduction of positive prestress effect and lead to decrease in shear load-bearing capacity.

### 5.3. Mechanical anchorage of tendons in pre-tensioned prestressed concrete

For the case when favourable is the change of stress distribution within the close-to-face zone of pre-tensioned concrete prefabricated element it is possible to decrease or eliminate prestressing force transmission length by the application of additional anchorage devices installed on the tendons. If anchor elements are applied with a guarantee surface for protection against crushing of concrete under the anchor and those elements will be properly connected with tendon, then it may be assumed that transmission length is reduced to zero. Additional anchorage occasionally is realized for pre-tensioned girders where it is necessary to maintain the prestressing force in the support zone. This type of treatment are also performed in realisation of the prestressed mono-block railway sleepers (28). Mechanical anchorage of tendons can be realized by:

- installing, on threaded ends of the prestressing bars, small steel anchorage shields [prestressing force is transferred to concrete both through bond restraints and pressure of shield to concrete] or by anchorage goblets with relatively large dia-

Zależność „naprężenie przyczepności – poślizg” w strunobetonie jest uzależniona od wielu czynników. Do najważniejszych należą: wytrzymałość, skład betonu, technologia betonowania i warunki dojrzewania betonu, wielkość otuliny betonowej, rodzaj cięgien sprężających, stan naprężenia cięgien oraz metody zwalniania naciągu.

Złożony stan naprężeń w strefie czołowej elementu, spowodowany przekazywaniem siły sprężającej na beton, powodować może różnego rodzaju uszkodzenia: rozrywanie, rozłupywanie i rozszczepianie. W konstrukcjach strunobetonowych nieposiadających zbrojenia poprzecznego takie zarysowania są niedopuszczalne i wykluczają możliwość wbudowania elementu.

Dla poprawy pracy strefy kotwienia cięgien sprężających możliwe jest stosowanie dodatkowego mechanicznego kotwienia strun – takie rozwiązania z powodzeniem stosowane są w produkcji podkładów kolejowych.

## Literature / References

1. Arab AA., Badie SS., Manzari M. A methodological approach for finite element modeling of pretensioned concrete members at release of prestressing. *Engineering Structures*, **33**, pp. 1918-1929 (2011).
2. Balázs GL. Transfer control of prestressing strands. *PCI Journal*, **37**, pp. 60-71 (1992).
3. Bolomsvik R., Lundgren K. Modeling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2006, **58** (3), pp. 123-133.
4. Bentur A., Cohen MD. Effect of condensed silica fume on the microstructure of the interfacial zone in Portland cement mortars. *Journal, American Ceramic Society* 1987, **70** (10), s. 738-743.
5. Cousins TE., Johnston DW., Zia P. Transfer length of epoxy-coated prestressing strand. *ACI Materials Journal*, 1990, **87** (3), pp. 193-203.
6. Cousins TE., Stallings JM., Simmons MB. Reduced strand spacing in pretensioned, prestressed members. *ACI Structural Journal*, 1994, **91** (3), pp. 277-286.
7. Derkowski W. Large panels buildings – the possibilities of modern precast industry, *Cement, Wapno, Beton* **5/2017**, pp. 414-425
8. Derkowski W., Dyba M. Behaviour of End Zone of Pre-tensioned Concrete Elements, *Procedia Engineering* **193**, 19-26.
9. Derkowski W., Słyś B., Szmit M. Effect of Strands' Anchorage System in Railway Sleepers on Behaviour of its Rail Seat Zone, *Architecture, Civil Engineering, Environment ACEE*, **1/2015**, pp.61-67
10. Derkowski W., Surma M. Influence of concrete topping on the work of prestressed hollow core slabs on flexible supports, 4th International fib Congress 2014 - Proceedings, pp. 339-341
11. Dyba M. Wpływ parametrów technologicznych na przyczepność betonu wysokowartościowego do stalowych splotów sprężających. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2014.
12. Dybeł P. Wpływ składu i właściwości betonów wysokowartościowych na przyczepność do stalowych prętów zbrojeniowych. Praca doktorska, Politechnika Krakowska, 2012.
13. Dybeł P., Furtak K. Wpływ zawartości pyłu krzemionkowego na sztywność przyczepności betonu wysokowartościowego do prętów zbrojeniowych. *Cement, Wapno, Beton* **79**, pp. 106-113 (2014).
14. EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2008

meter [pre-stressing force transferred to concrete only by the resistance of anchorage goblets];

- application of BBRV anchorage technology – smooth bars with cold-formed button heads anchored in massive steel plates.

Effectiveness of mechanical anchorage application in pre-tensioned pre-stressed railway sleepers has been proved experimentally in tests conducted at Cracow University of Technology (9). For such sleepers the higher load-bearing capacity under static, dynamic and fatigue load was indicated.

## 6. Summary

Bond stress of steel reinforcement to concrete constitutes the basis for proper analysis of reinforced concrete and prestressed concrete structures. For ultimate limit states the bond stress is necessary to obtain anchorage of reinforcement and it influences the ability to rotate within possible plastic hinges. In analysis of serviceability limit states it affects the crack width and decide about the durability of structure.

Relationship „bond stress – slippage” in pre-tensioned concrete structures depends on numerous factors. The most important are: strength and composition of concrete mix, method of concreting and maturity conditions, magnitude of concrete cover, type of prestressing tendons, stress state in tendons and technology of prestress release.

Complex stress state in close-to-face zone of the element, caused by transferring the prestressing force to concrete, may result in different damages: bursting, splitting and spalling. In pre-tensioned structures without transverse reinforcement such cracks are unacceptable and result in inability to built-in the element.

In order to improve the behaviour of prestressing tendons in anchorage zone it is possible to apply additional mechanical anchorage devices – such solutions are successfully used in railway sleepers.

15. fib Bulletin 10. Bond of reinforcement in concrete. FIB, 2000.
16. fib Bulletin 65. Model Code for Concrete Structures 2010, FIB, 2012
17. Hegger J., Bertram G. Verbundverhalten von vorgespannten Litzen in UHPC – teil 1: Versuche zur verbundfestigkeit und übertragungslänge. Beton und Stahlbeton, **105**, pp. 379-389 (2010).
18. Hosseini SJA. et al. Zagadnienie przyczepności w betonie zbrojonym, przegląd stanu wiedzy. Cement, Wapno, Beton, **79**, pp. 93-105 (2014).
19. Hosseini SJA. et al. Zagadnienie przyczepności w betonie zbrojonym, przegląd stanu wiedzy, część druga. Cement, Wapno, Beton **79**, pp. 384-395 (2014).
20. Hwang S., Lee Y., Lee C. Effect of silica fume on the splice strength of deformed bars of high-performance concrete. ACI Structural Journal, **91**, pp. 294-302 (1994).
21. Janney J. R. Nature of bond in pre-tensioned prestressed concrete, ACI Journal, , **50**, pp. 717-736 (1954).
22. Kaar PH., LaFraugh RW., Mass MA., Influence of concrete strength on strand transfer length. PCI Journal, , **8** (5), pp. 47-67 (1963).
23. Kimura H., Jirsa J., Effects of bar deformation and concrete strength on bond of reinforcing steel to concrete. Proceedings, International Conference on Bond in Concrete, Riga, 1992.
24. Kose MM., Burkett WR., Formulation of new development length equation for 0,6 in. prestressing strand. PCI Journal, September-October, **50** (5), pp. 96-105 (2005).
25. Mitchell D., Cook W. D., Khan AA., Tham T. Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioned strand. PCI Journal, 1993, **38** (3), pp. 52-66.
26. Mote J., Bond mechanics of steel prestressing strand. Norman Oklahoma: University of Oklahoma, 2001.
27. Oh BH., Kim ES. Realistic evaluation of transfer lengths in pretensioned, prestressed concrete members. ACI Structural Journal, **97** (6), pp. 821-830 (2000).
28. Pawluk, J., Derkowski W. Factors determining the properties and durability of pre-tensioned railway sleepers, Cement, Wapno, Beton, **81** , pp. 347-360 (2016)
29. Peterman RJ. The effects of as-cast depth and concrete fluidity on strand bond. PCI Journal, **52** , pp. 72-101 (2007).
30. Russell BW. Impact of high strength concrete on the design and construction of pretensioned girder bridges. J. of Structural Engineering, **39** (4), pp. 76-89 (1994).
31. Russell BW., Burns NH. Measurement of transfer lengths on pretensioned concrete elements. J. of Structural Engineering, **123** (5), pp. 541-549 (1997).
32. Seruga A. Zależność naprężenie przyczepności-poślizg betonu do zbrojenia w elementach strunobetonowych z betonów wysokowartościowych. Materiały konferencyjne KS 2018, 2018, s 25-51.
33. Seruga A., Jaromska E. Transmission length of tensioning force in prestressed concrete panel elements, Technical Transactions **4-B/2012**, pp. 75-102
34. Shahawy MA, Issa M., Batchelor BD. Strand transfer lengths in full scale AASHTO prestressed concrete girders. PCI Journal, **37** (3), pp. 84-96 (1992).
35. Stroeven P., De Wind G., Structural and mechanical aspects of debonding of a steel bar from cementitious matrix. Bond in Concrete. Applied Science Publishers, pp. 40-50.
36. Zia P., Mostafa T., Development length of prestressing strands, PCI J. September-October 1977, **22** (5), pp. 54-63.