

Czynniki decydujące o właściwościach i trwałości strunobetonowych podkładów kolejowych

Factors determining the properties and durability of pre-tensioned railway sleepers

1. Wprowadzenie

Strunobetonowe podkłady kolejowe są jednym z kluczowych elementów transportu szynowego i niejednokrotnie to właśnie one decydować mogą o bezpieczeństwie ruchu kolejowego i trwałości nawierzchni. Minimalny projektowy okres użytkowania podkładów betonowych, gwarantujący bezpieczeństwo ruchu kolejowego wynosi 40 lat, choć oczekiwać można, że będą one jeszcze trwalsze. Właśnie dlatego proces produkcji strunobetonowych podkładów kolejowych musi odbywać się z zachowaniem najwyższych standardów. Rygorystyczne wymagania stawiane są zarówno używanym materiałom, jak i samemu procesowi technologicznemu. Wieloletnie obserwacje pokazują, że dobrze wykonane podkłady mogą osiągać założoną żywotność, ale jednocześnie można przytoczyć liczne przykłady występowania uszkodzeń podkładów, wymagające wymiany nawierzchni kolejowej na długich odcinkach. Występujące przez szereg lat w Europie problemy z wbudowanymi podkładami strunobetonowymi za każdym razem generowały poważne koszty społeczne. Wiązały się one ze zmniejszeniem prędkości przejazdu, ograniczeniami w ruchu kolejowym, utrudnieniami na drogach wariantowych oraz z dużymi kosztami wymiany uszkodzonych odcinków nawierzchni.

O trwałości strunobetonowych podkładów decydują ich właściwości fizyczne i chemiczne, przy czym lepiej poznane są te pierwsze, natomiast chemiczne właściwości betonu ograniczają się do podania rodzaju cementu oraz zawartości sumy sodu i potasu. Te ostatnie określa się nieprawidłowo jako „alkalia” nie zwracając uwagi, że nawet Neville (1) w swoim doskonałym dziele „Właściwości betonu” zwraca uwagę, że jest więcej „alkaliów” w cemencie. Poprawnie zawartość sodu i potasu należało by określać jako „ekwiwalent sodowy”, który wynosi: $\text{Na}_2\text{O}_e = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$. Równocześnie w przepisach kolejowych nie rozróżnia się zawartości tych pierwiastków jako całkowite i rozpuszczalne. Nie ma nawet polskiej normy podającej metodę oznaczania tej ostatniej zawartości. Wszystkie te zagadnienia omówimy w dalszej części artykułu.

1. Introduction

Pre-tensioned railway sleepers are one of the key-elements of the railway transportation systems and the one, that the safety of the railway traffic and durability of the pavement depends from. The minimum design service life of concrete sleepers, providing the safety of the railway traffic is 40 years, although the longer period and higher durability could be expected. Those are the reasons for production process of pre-tensioned railway sleepers to meet the highest standards. Strict requirements concern both applied materials and manufacturing process. Multiannual observations revealed that properly manufactured railway sleepers might obtain assumed lifespan, but simultaneously, various examples of occurrence of damages resulting in the necessity of the replacement of the long sections of railway pavements are reported. Longstanding occurrence of the problems concerning the built-in pre-tensioned sleepers in whole Europe, each time generated serious social costs. Those were connected with the decrease of the travelling speed, restrictions in railway traffic, hindrances on alternative routes and major costs of the replacements of the damaged pavements sections.

The physical and chemical properties of pre-tensioned railway sleepers are governing on their durability, however, the first are much better studied, but the chemical properties are much less known. They are limited frequently to the content of sodium and potassium, presented as Na_2O_e “sodium equivalent” equal to $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O}$. This both oxides are wrongly named as “alkalis”, without paying attention that Neville (1), in his wonderful book “Properties of Concrete”, is paying attention that there are much more “alkalis” in cement. Simultaneously in Railways Regulation the content of “soluble in water” and total as the sum of “soluble + not-soluble” are not differentiated. In Polish Standards even the method of “soluble” sodium and potassium content determination is not given. All these problems will be discussed in this paper.

2. Technologie stosowane w produkcji podkładów

Na świecie stosowane są różne technologie produkcji strunobetonowych podkładów kolejowych, różniące się przede wszystkim technologią sprężania. Możliwa jest produkcja podkładów na długim, stałym torze naciągowym [rysunek 1a] lub w przesuwanych formach sztywnych, najczęściej mieszczących 4 podkłady i poruszających się karuzelowo [rysunek 1b].

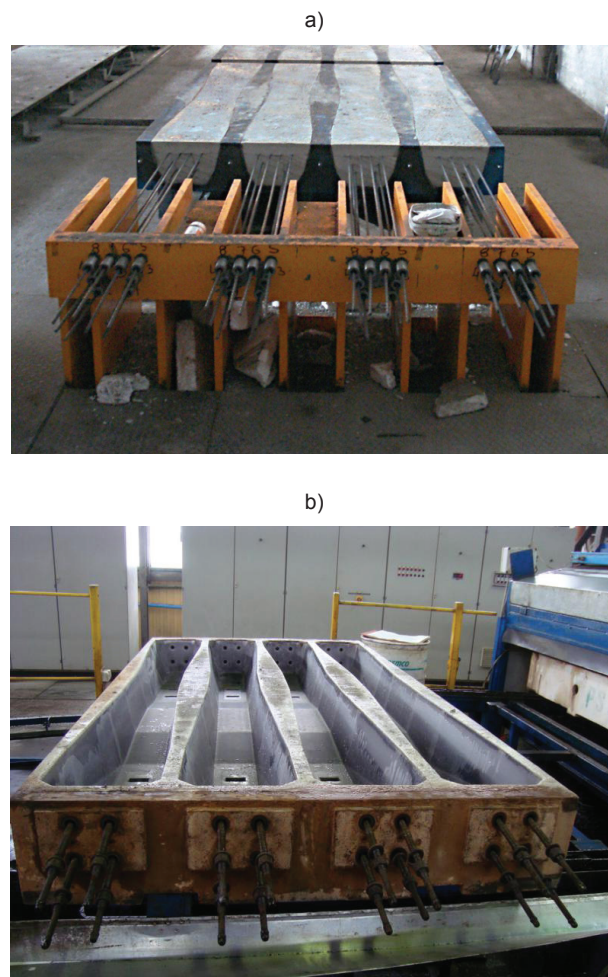
W zależności od metody kotwienia strun sprężających, wyróżnić można następujące rodzaje podkładów zbrojonych drutami lub prętami [rysunek 2]:

- podkłady z cięgnami o niewielkim przekroju poprzecznym, w postaci drutów gładkich o średnicy 5 mm lub 7 mm, produkowane na długich torach naciągowych. Po przecięciu cięgien podkład zostaje poddany naprężeniu ściskającemu, które jest przekazywane poprzez wiązanie – adhezję zaczynu cementowego ze stalą oraz siły tarcia;
- podkłady z cięgnami z prętów profilowanych o większej średnicy, na przykład o średnicy 10,5 mm, produkowane w sztywnych formach. Stosunkowo duża siła sprężająca przekazywana jest na beton poprzez więzy analogiczne jak w przypadku a), jednak jest zwiększona dodatkowo przez mechaniczne zazębienie się stali z betonem;
- podkłady podobne do podkładów typu b), z tym że na gwintowanych końcówkach prętów sprężających instalowane są niewielkie stalowe tarczki kotwiące. Dzięki temu siła sprężająca jest przekazywana na beton analogicznie jak w przypadku podkładów b), a także przez opór tarczek;
- podkłady z cięgnami z prętów gładkich lub profilowanych. Na gwintowanych końcówkach prętów instalowane są kielichy kotwiące o stosunkowo dużej średnicy, blokowane nakręcanymi tulejami. Siła sprężająca przekazywana jest na beton głównie poprzez opór kielichów kotwiących;
- podkłady z cięgnami z prętów gładkich, głównie o średnicy 7 mm, z końcówkami w postaci główek, opartymi na maszynowych stalowych płytkach kotwiących. Siła sprężająca przekazywana jest na beton przede wszystkim poprzez opór płytek kotwiących.

Praktyczne zastosowanie technologii mocowania strun opisaną w punkcie e) w zakładach podkładów strunobetonowych pokazano na rysunku 3.

Poza wyżej wymienionymi, najczęściej obecnie spotykanymi rodzajami podkładów, możliwe są również inne rozwiązania konstrukcyjne, na przykład stosowanie zbrojenia sprężającego złożonego ze splotów trzech lub siedmiu gładkich drutów, spiralnie skręconych.

W przypadku strunobetonowych podkładów lub podrozdzielnic kolejowych, w których przekrój podszynowy jest zwykle najbardziej wyężonym przekrojem w elemencie, o bezpieczeństwie całej konstrukcji decyduje długość odcinka, na którym następuje przekazanie siły sprężającej na beton. Jest on w normach nazy-



Rys. 1. a) produkcja podkładów na długim torze naciągowym, b) forma mieszcząca cztery podkłady

Fig. 1. Manufacturing of sleepers in: a) prestressing bed, b) four sleepers mould

2. The sleepers production technologies

Various manufacturing technologies of pre-tensioned railway sleepers are applied throughout the world, the differences concerning mainly the technology of prestressing. Among the possible technological solutions are production of the sleepers on the stable prestressing bed [Fig. 1a] and in rotary carousel-type rigid moulds, most often holding 4 sleepers [Fig. 1b].

Depending on the anchorage type of the prestressing strands, the following types of the sleepers prestressed with strands or wires could be distinguished [Fig. 2]:

- sleepers with the small cross-section tendons, in 5 mm or 7 mm smooth wires, manufactured on prestressing beds. After the releasing of prestressing force the sleeper is subjected to the influence of the compressive stresses, that are transferred by the bond – adhesion between cement grout and steel and by friction forces;
- sleepers with the indented wires with the larger diameter, e.g. 10,5 mm, manufactured in the rigid molds. Relatively high prestressing force is transferred to the concrete by bond

wany długością transmisji l_{pt} . W przypadku konstrukcji podkładów, w których przekazywanie siły sprężającej zachodzi głównie w wyniku adhezji i tarcia, a więc podkładów oznaczonych a) i b) na rysunku 2, stosunkowo duża długość transmisji l_{pt} powoduje brak możliwości uzyskania nośności lub odporności na powstawanie rys, w tej najbardziej newralgicznej części elementu.

3. Analiza przyczepności zbrojenia do betonu w strunobetonie

Przyczepnością nazywa się zespół czynników zabezpieczających przerwanie wiązania między dwoma materiałami. Najważniejszymi z nich są: adhezja, siły tarcia oraz mechaniczne zazębienie nierówności poboczniczy zbrojenia o beton (2, 3). 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 Hoyer'a.

Siły adhezji są wiązaniem powierzchni różnych materiałów w wyniku powstawania wiązań chemicznych między cząsteczkami. Występują one w strefie przejściowej beton - stal. Siły przyciągania powierzchniowego są małe, ocenia się je na tym samym poziomie co wiązanie zaczynu z kruszywem; wynoszą one po 28 dniach, w przypadku betonu nie poddanego obróbce termicznej około 1,4 MPa (4). Ich udział w naprężeniach przyczepności ustaje w chwili pojawienia się pierwszych rys w strefie przejściowej, związanych z poślizgiem zbrojenia. Przyjmuje się zatem, że mechanizm adhezji w konstrukcjach strunobetonowych występuje jedynie poza długością transmisji siły sprężającej, czyli w obszarach, w których występują jednakowe odkształcenia stali i otaczającego ją betonu. W rozważaniach inżynierskich wpływ samej adhezji na przyczepność często jest zaniedbywany, aczkolwiek nie jest to uzasadnione.

Tarcie wewnętrzne jest podstawowym czynnikiem fizycznym mającym wpływ na naprężenia przyczepności (5). Jest to opór przeciwdziałający równoległemu przemieszczeniu się dwóch powierzchni utrzymywanych w bezpośrednim kontakcie przez siłę prostopadłą do kierunku działania siły przemieszczającej. Powierzchnia, wzdłuż której następuje poślizg, w przypadku jej dużej gładkości znajduje się na granicy między stalą i betonem, a dla bardziej szorstkich powierzchni przebiega poprzez warstwę zaczynu cementowego (6). Siły tarcia na styku betonu i stali wywołane są skurczem dojrzewającej mieszanki betonowej w czasie wiązania i twardnienia betonu. Odkształcenia skurczowe betonu powodują powstanie normalnego naprężenia do osi podłużnej zbrojenia na powierzchni jego kontaktu z betonem, w postaci naprężenia ściskającego. Powoduje to zmianę naprężenia w pręcie stalowym oraz jego poprzeczną

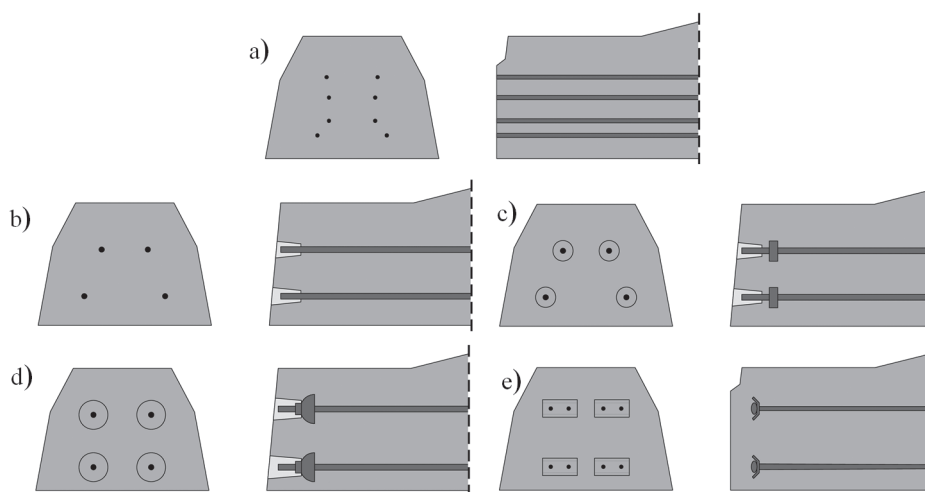
stresses analogical to the type a), but additionally increased by mechanical interlock of steel and concrete;

- c) sleepers similar to those from the type b), but for the small steel anchorages shields installed at the threaded tips of the prestressing bars. Thereby the prestressing force is transferred to the concrete similarly as in the type b) sleepers but also by the pressure of shield to concrete;
- d) sleepers with the smooth or indented wires. On the threaded tips of bars anchorage goblets with the relatively big diameter are installed and locked with nuts. The prestressing force is transferred to concrete by the resistance of the anchorage goblets;
- e) sleepers with the smooth wires, mainly 7 mm in the diameter. Tips of the bars have cold-formed button heads, anchored on the massive steel anchorage plates. The prestressing force is transferred to the concrete by the resistance of the anchorage plates.

Practical application of the anchorage technology described in the point c) in TrackTec manufacturing plant is shown on the Fig. 3.

Apart from the most popular types of the railway sleepers, listed above, there are other possible solutions, for example application of the prestressing reinforcement in the form of three or seven-wire strands.

In the case of the pre-tensioned railway sleepers or bearers, where the rail seat cross-section is usually the most loaded cross-section in the whole element, the safety of the structure is determined by the length of section, on which the prestressing force is transmitted to the concrete. In the codes this section is called transmission length l_{pt} . For the sleepers types a) and b) [Fig. 2], where the prestressing force is transmitted to the concrete mainly due to the adhesion and friction forces, relatively large transmission length l_{pt} results in the impossibility of acquiring the bearing capacity or crack resistance in this most sensitive section of the element.



Rys. 2. Schematy zasad kotwienia cięgien

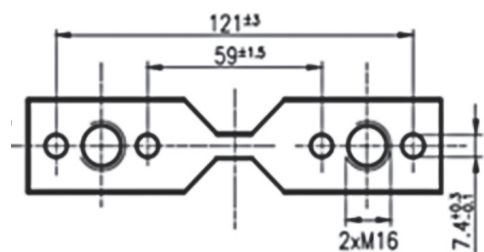
Fig. 2. The diagrams of the anchorage types of tendons

deformację, co następnie wywołuje radialne przemieszczenie powierzchni kontaktowej cięgna zbrojeniowego.

Do opisu rozkładu naprężenia przyczepności wzdłuż długości zakotwienia zakłada się zachodzenie relacji pomiędzy wielkością poślizgu a współczynnikiem tarcia, który jest zależny jedynie od właściwości zastosowanego betonu. Największy współczynnik tarcia odpowiada początkowi poślizgu, czyli miejscu położenia początku kotwienia cięgna, a wraz ze wzrostem poślizgu cięgna, współczynnik tarcia maleje asymptotycznie, aż do pewnej stałej wartości [rysunek 4] (2, 3).

Mechanizm zazębienia mechanicznego zaczyna odgrywać decydującą rolę gdy powstaje możliwość przemieszczenia się (poślizgu) zbrojenia w stosunku do otaczającego betonu. Jest to wywoływane ukształtowaniem pobocznic wstawki zbrojeniowej, powodującym mechaniczne blokowanie się zbrojenia o dyble uformowane z betonu wzdłuż powierzchni bocznej cięgna - dla prętów i drutów w strefach nagniecia lub innych form profilowania, a w przypadku spłotów – w przestrzeniach między spiralnie skręconymi drutami. W przypadku spłotów wielodrutowych, nieregularności ich kształtu oraz niejednorodność przekroju sprawiają, że efekt klinowania jest znacznie większy niż drutu gładkiego lub pręta nagniatanego (7). W splocie, zewnętrzne druty są spiralnie zwinięte wokół centralnego rdzenia. Mieszanka betonowa w trakcie formowania elementu całkowicie otacza spłot, dostając się w szczeliny pomiędzy drutami zewnętrznymi. Po stwardnieniu betonu podłużne spiralne kliny pełnią rolę mechanicznego zakotwienia spłotu, podobnie jak w przypadku prętów uźebrowanych. W chwili przekazywania siły sprężającej na beton spłot ma tendencję do przemieszczania się w głąb betonu, czyli doznaje tak zwanego „wślizgu”. Zewnętrzne druty wykazują tendencję do rozkręcania, jednak napotykają na opór. Ponadto, przy obciążeniu elementu spłot ulega deformacji, która powoduje powstanie momentu skręcającego, równoważonego przez naprężenia kontaktowe wzdłuż jego obwodu. Warunkiem aby efekt wpływu zazębienia mechanicznego na przyczepność był maksymalnie wykorzystany jest, zablokowanie rozkręcania się spłotu. To właśnie szczelna otulina betonowa blokuje możliwość wystąpienia obrotu spłotu [rysunek 5] (7).

Mechanizm klina [efekt Hoyer'a], występujące w konstrukcjach strunobetonowych, to jest gdy zbrojenie poddane jest wstępnemu rozciąganiu, jeszcze przed zabetonowaniem elementu. Na skutek wprowadzenia siły rozciągającej, cięgno zmniejsza swoją średnicę i pole powierzchni przekroju poprzecznego o wielkość wynikającą ze współczynnika Poissona. Po jego zabetonowaniu, w chwili zwolnienia naciągu, to jest przekazania siły sprężającej na beton, zbrojenie wykazuje tendencję powrotu do pierwotnych wymiarów. Stwardniały beton otaczający cięgno ogranicza ich poprzeczne odkształcenia (rozszerzanie), co wywołuje powstawanie ściskających sił normalnych do pobocznic cięgien (radialnych do osi). W efekcie powstają dodatkowe siły tarcia wzdłuż osi cięgna. Powstałe siły tarcia są skierowane przeciwnie do sił wymuszających przemieszczenie stali względem betonu. Zjawisko to, schematycznie zobrazowane na rysunku 6, po raz pierwszy zdefiniował Hoyer (8)



Rys. 3. Płytki kotwiące oraz zamocowanie płytek w formie przed jej zabetonowaniem stosowane w zakładach TrackTec

Rys. 3. Anchorage plate and mounting of the plate in mold, before casting of the concrete – technology applied by TrackTec

3. Analysis of the bond between concrete and reinforcement in pre-tensioned concrete elements

Bond forces are described as the set of factors preventing the breaking-off the contact between materials. The most significant ones are the following: adhesion, friction forces and mechanical interlock of reinforcement peripheral roughness and surrounding concrete (2, 3). In pre-tensioned structures bond stresses of the steel reinforcement subjected to the initial tensioning in transmission zone of the prestressing force is additionally increased by the component induced by tendons wedging mechanism [Hoyer's effect].

Adhesion forces describes the connection between particles of different materials on molecular level. Such forces occur on the contact zone between phases: concrete – steel. The values of surface attraction forces are small, they are estimated on the same level as bond forces between cement mortar and aggregate; after 28 days, for the concrete not subjected to the heat-treatment they reach the level of approximately 1.4 MPa (4). Their contribution to bond stress vanishes at the moment of the first crack appearance on materials surface contact, that is to say slippage of the tendon. Hence, it is assumed that adhesion mechanism in pre-tensioned concrete structures occurs only outside the prestressing force transmission length, i.e. for the zones where exist the accordance of strains between steel and surrounding concrete. For engineering discussions the influence of adhesion is often negligible, although it is not justified.

The inner friction is the basic physical phenomenon influencing the bond stresses (5). It is the resistance to parallel displacement

w 1939 roku, badając zachowanie betonu sprężonego gładką struną fortepianową, o bardzo małej średnicy.

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

- usytuowanie zbrojenia w przekroju elementu, a mianowicie otulenie betonem i odległość zbrojenia od górnej powierzchni elementu w trakcie betonowania;
- rodzaj i wytrzymałość betonu na ściskanie;
- jakość powierzchni cięgna sprężającego [ślady rdzy i zabrudzenia powierzchni];
- metoda zwalniania naciągu, czyli nagłe lub stopniowe jego zwalnianie.

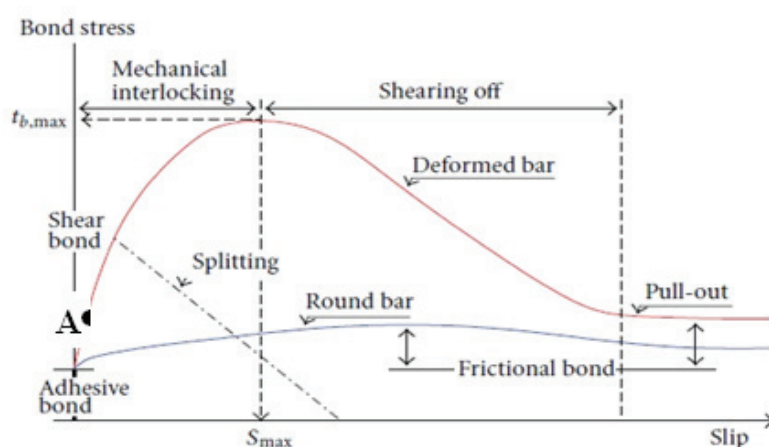
3.1. Wzrost przyczepności wzdłuż długości cięgna

Hegger i Bertram (9) zaproponowali w 2010 roku model rozwoju przyczepności obejmujący długość transmisji, który przedstawiono na rysunku 6. Naprężenia przyczepności wzdłuż długości transmisji nie są stałe; ich lokalna wartość wynika z sumy naprężeń wywołanych adhezją, tarciem i zazębieniem mechanicznym. Ponieważ udział efektu Hoyer'a i pozostałej siły sprężającej, obejmujących długość transmisji zmieniają się, wyróżnia się cztery obszary wprowadzenia 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 aktywuje się największa siła przyczepności, wynikająca z efektu Hoyer'a;
- obszar środkowy (b) - siła sprężająca została już częściowo przekazana ze stali 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 ulegają zmniejszeniu;
- 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 dla zapewnienia współpracy cięgna z otaczającym go betonem. Bez dodatkowych obciążeń zewnętrznych nie występuje poślizg.

3.2. Obliczanie długości transmisji według najnowszych przepisów normowych

Wytyczne obecnie obowiązującej we wszystkich krajach Unii Europejskiej normy dla konstrukcji z betonu zbrojonego EC2 (10)



Rys. 4. Zmiany sił przyczepności w wyniku poślizgu, aż do wyrwania cięgna (2, 3)

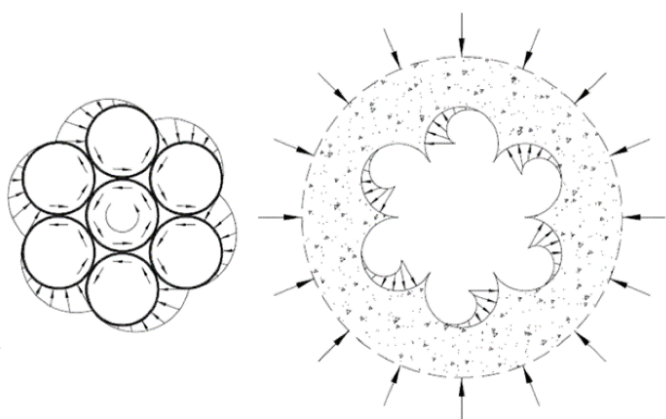
Fig. 4. Changes of the bond stresses due to the slippage, up to the pull-out of the tendon (2, 3)

of two surfaces remaining in the direct contact, due to the force perpendicular to direction of the applied displacing 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 (6). Friction forces on the contact between concrete and steel result from shrinkage due to curing of concrete mix during hardening process. Shrinkage strain of concrete produces the normal stress at the contact surface – radial compressive stress perpendicular to reinforcement longitudinal axis. This stress causes the change of stress state in steel and transverse deformation, which finally results in radial displacement of the contact surface.

To describe the distribution of bond stress along the anchorage length, the existence of the relationship between the slippage and friction coefficient, depending only on the parameters of applied concrete, is assumed. The highest value of friction coefficient corresponds to the beginning of slippage, which is the point of beginning the tendon anchorage. With the increase in the value of tendon slippage the friction coefficient decreases asymptotically down to the constant value [Fig. 4] (2, 3).

Mechanism of the mechanical interlock plays the essential part at the moment when the possibility of the reinforcement displacement in relation to the surrounding concrete occurs. It is induced by the shaping of reinforcing bars periphery, resulting in mechanical blockage of reinforcement at dowels formed from concrete along the tendons side surface. For rebars and wires in indentation zones or other forms of surface profiling and for strands – in the zones between spiral wind-up wires.

For multi-wire strands, irregularities of their shape and non-homogeneity of cross-section causes that wedging effect is visibly larger than in case of smooth or indented bars (7). In strands, external wires are spirally wind-up around the central wire. Concrete mix applied during casting completely surrounds strands filling the gaps between external wires. After concrete hardening, the longitudinal spiral wedges play a role of the mechanical anchorage of the



Rys. 5. Schemat zazębienia mechanicznego splotu sprężającego (7)

Fig. 5. Diagram of the interlocking mechanism in prestressing strand (7)

mówią, że przy zwolnieniu naciągu siła sprężająca przekazywana jest na beton przy stałym na długości zakotwienia naprężeniu przyczepności f_{bpt} , określonym wzorem:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{cta}(t),$$

gdzie:

η_{p1} jest współczynnikiem zależnym od rodzaju cięgna;

η_1 jest współczynnikiem zależnym od usytuowania cięgna na wysokości przekroju;

$f_{cta}(t)$ jest obliczeniową wytrzymałością betonu na rozciąganie w momencie zwolnienia naciągu.

Podstawową długość transmisji oblicza się na podstawie formuły:

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}},$$

gdzie:

α_1 jest współczynnikiem zależnym od sposobu zwalniania naciągu;

α_2 jest współczynnikiem zależnym od rodzaju cięgna;

ϕ jest nominalną średnicą cięgna;

σ_{pm0} jest naprężeniem w cięgnię, natychmiast po zwolnieniu naciągu.

Bardzo podobne, z teoretycznego punktu widzenia, jest podejście do tego zagadnienia, prezentowane w „pre-normie” Model Code 2010 (10) – dokumencie opracowanym przez wielu wybitnych specjalistów z kilkudziesięciu krajów i opublikowanym ostatnio przez FIB (Fédération Internationale du Béton), który stanowić będzie podstawę przyszłej modyfikacji normy (11). Zauważalne są jednak spore różnice w wielkościach poszczególnych współczynników. Analiza tych zapisów wskazuje, że przy założeniu tej samej klasy betonu oraz identycznej wielkości siły sprężającej, wartość podstawowej długości transmisji otrzymana w obliczeniach według (11) jest większa od wartości uzyskiwanej według (10) o ok. 35% w przypadku drutów i ok. 75% w przypadku splotów. Należy również pamiętać, że wielkość naprężeń przyczepności jest uzależniona w rzeczywistości od bardzo wielu czynników – stąd Eurokod

strand, similarly as for ribbed bars. At the moment of transferring of the prestressing force to the concrete, strands have a tendency to move inside the concrete, so called “slippage”. External wires while trying to un-wind are subjected to resistance. Additionally, at loading of the element, strands undergo the deformation resulting in forming of torsion moments balanced by contact stresses along the margin of the strand. To take the maximum advantage of the mechanical interlock influence onto the bond, it is necessary to block the strand un-winding. Tight concrete cover is the factor preventing the possibility of the rotation of the strand [Fig. 5] (7).

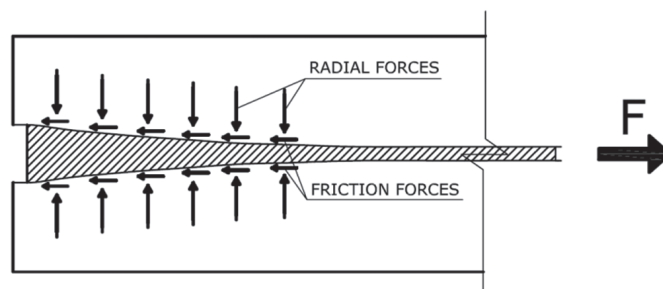
Wedge mechanism [Hoyer's effect] occurs in the pre-tensioned concrete structures, when the reinforcement is subjected to pre-tensioning before casting of the concrete. Due to the introduction of tensile force, strands reduce their diameter and cross-section area by the values resulting from the Poisson's ratio. After casting of the element, at the moment of releasing of the strands [transfer of prestressing force to the concrete] reinforcement reveals the tendency to regain its initial shape. Hardened concrete surrounding tendons constrains their transverse strains [expansion], which generates normal compressive force on the tendons peripheral [radial to axis]. 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 phenomena, presented on the Fig. 6, was initially identified by Hoyer in 1939 (8), who investigated the behavior of concrete prestressed with small diameter smooth piano string.

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

- location and arrangement of reinforcement in the cross-section of the element -concrete cover and distance of the reinforcement from the upper surface of element during casting;
- type of concrete and concrete compressive strength;
- strands surface quality [rust tracks, soiled surface];
- prestress release technology [gradual or sudden].

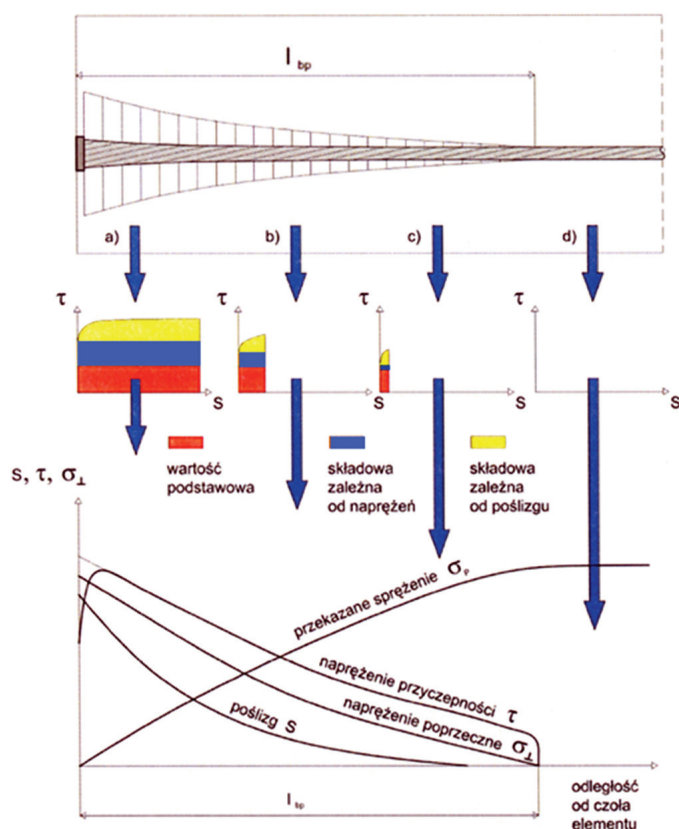
3.1. Bond stress development at the tendons length

In 2010 Hegger and Bertram (9) presented the model for bond stress development at transmission length – its graphical representation is shown in Fig. 6. Bond stresses along the transmission



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie efektu Hoyera w konstrukcji strunobetonowej

Fig. 6. Graphic presentation of the Hoyer's effect in pre-tensioned structure



Rys. 7. Składowe przyczepności wzdłuż długości transmisji (9)

Fig. 7. Bond components along transmission length (9)

2 (10) nakazuje do obliczeń przyjmować wartości bezpieczne, które mogą różnić się od podstawowej długości transmisji o $\pm 20\%$.

3.3. Zarysowania betonu w strefie czołowej podkładu

Przekazywanie siły sprężającej na beton w strefie czołowej podkładu strunobetonowego powoduje powstanie złożonego, przestrzennego stanu naprężeń, składającego się z podłużnych strumieni naprężeń ściskających beton oraz poprzecznych naprężeń rozciągających. Pre-norma konstrukcji betonowych - Model Code 2010 (10) - definiuje trzy rodzaje powstających w tej strefie rys w elemencie strunobetonowym, które mogą mieć zasadniczy wpływ na prawidłowe zakotwienie cięgien w betonie. Są to:

- rozszczepianie zachodzące wzdłuż powierzchni kontaktowej cięgien i betonu będące głównie wynikiem efektu Hoyer'a – schematycznie oznaczone 1 na rysunku 8. Przykład rozszczepienia czoła strunobetonowego podkładu kolejowego pokazano na rysunku 9a,
- rozrywanie elementu wywołane poprzecznymi naprężeniami rozciągającymi w betonie – schematycznie oznaczone 2 na rysunku 8. Przykład zniszczenia podkładu kolejowego zainicjowanego przez rysy spowodowane rozrywaniem czoła pokazano na rysunku 9b;
- ukośne zarysowania betonu wzdłuż pobocznicy cięgna wywołane utratą jego przyczepności do betonu – schematycznie oznaczone 3 na rysunku 8.

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 residual prestressing force on transmission length vary, the four regions for the force introduction are distinguished:

- border region a) – maximum difference between stresses in steel and concrete, high transverse pressure and maximum bond stresses, as a result of the final slippage 1+2 mm the biggest 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 the transfer of the prestressing results in lower transverse pressure and smaller slippage. Hence, the bond component depending on stress and component depending on 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 small; slight slippage occurs;
- region outside the transmission length d) – force equilibrium is reached without further transmission of the prestressing force and bond restraints without transverse pressure are sufficient to provide interaction of strand and surrounding concrete; without additional external loads there is no slippage.

3.2. Calculation of the transmission length according to the latest regulations

Eurocode 2 (10), the current regulations concerning reinforced concrete structures, which are obligatory in all countries of European Union, states that at the release of the tendons, the prestressing force is transferred to the concrete by a constant [at the anchorage length] bond stress f_{bpt} defined below:

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t),$$

where:

η_{p1} is a coefficient that takes into account the type of tendon;

η_1 is a coefficient concerning the position of tendon at the height of cross-section;

$f_{ctd}(t)$ is the design value tensile concrete strength at the moment of the release of the tendons.

The basic value of the transmission length is calculated from the formula:

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \phi \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}},$$

where:

α_1 is coefficient taking into account the method of tendons release;

α_2 is a coefficient that takes into account the type of tendon;

ϕ is nominal diameter of tendon;

σ_{pm0} is stress in the tendon just after release.

Much the same, from the theoretical point of view, is the approach

Bardzo często opisane mechanizmy nakładają się wzajemnie na siebie, a ich łączny efekt nie tylko zmniejsza trwałość, lecz może mieć wpływ na pogorszenie przyczepności zbrojenia sprężającego, co wpływa niekorzystnie na nośność i odporność na powstawanie rys przekrojów znajdujących się w niedużej odległości od czoła podkładu.

3.4. Doświadczalne badania nośności i odporności na rysy strefy podszynowej kilku rodzajów podkładów

W Politechnice Krakowskiej przeprowadzono badania strunobetonowych podkładów kolejowych, w których zastosowano różne metody kotwienia cięgien sprężających, znane w krajach Unii Europejskiej (12). Doświadczenia obejmowały podkłady PS-83 i PS-94, wykonane w następujących technologiach, pokazanych schematycznie na rysunku 10:

- 1) podkład PS-83, sprężony ośmioma gładkimi drutami o średnicy 7 mm z zakotwieniem główkowym systemu BBRV¹ i masywnymi płytkami kotwiącymi;
- 2) podkład PS-94, sprężony ośmioma gładkimi drutami o średnicy 7 mm z zakotwieniem główkowym systemu BBRV¹ i masywnymi płytkami kotwiącymi;
- 3) podkład PS-83, sprężony czterema profilowanymi prętami o średnicy 10.5 mm z dodatkową płytką kotwiącą o średnicy 30 mm, nakręcaną na gwintowaną końcówkę pręta;
- 4) podkład PS-94 sprężony czterema profilowanymi drutami o średnicy 9.5 mm, których kotwienie polegało wyłącznie na przyczepności betonu do stali;

We wszystkich badanych podkładach naciągowa siła sprężająca wynosiła 360 kN.

Badania prowadzono metodami opisanymi w normie EN 13230-2 (12), które obejmowały próby statyczne, obciążenia dynamiczne oraz długotrwałe obciążenia zmieniające się cyklicznie. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że nośność podkładów w strefie podszynowej była zależna głównie od metody kotwienia cięgien. Największe obciążenie niszczące wykazały podkłady z cięgnami kotwionymi za pomocą stalowych płytek oporowych. Najmniejszą nośność miały podkłady, w których druty profilowane były połączone z betonem głównie adhezją. Różnica nośności wynosiła aż 36%. Podkłady 3 i 4 osiągnęły nośność około 23% mniejszą od 1 i 2, co było spowodowane w przypadku podkładu 3 niszczaniem gwintu łączącego pręt żebrowany z tarczką oporową, a 4 braku mechanicznego kotwienia. Zastosowanie prętów profilowanych korzystnie zwiększyło odporność podkładów na powstawanie rys, jednak różnice pomiędzy obciążeniem powodującym zarysowanie elementu zbrojonego prętami żebrowanymi a drutami gładkimi nie są duże, natomiast zwiększenie szerokości rozwarcia rys do wartości 0,05 mm przebiega praktycznie tak samo. Obciążenie zmęczeniowe tylko w niewielkim stopniu obniżało nośność strefy podszynowej, a spadek ten był porównywalny we wszystkich badanych elementach.

¹ Birkenmaier, Brandestini, Ros, Vogt

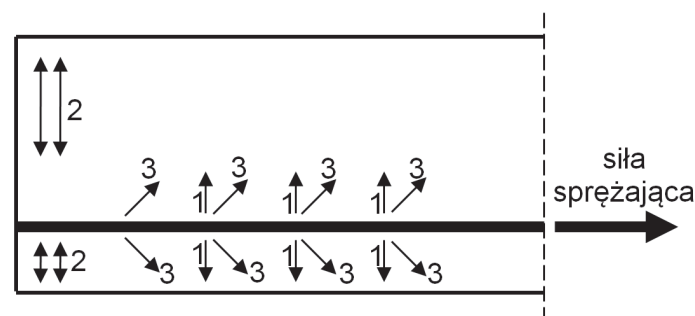
to this problem, presented in the Model Code 2010 (11) – the document that was developed by many outstanding specialists from various countries, and published recently by *fib* [Fédération Internationale du Béton]. That document would be the base for future modifications of the code (10). However, some major differences could be noticed in the values of several coefficients. Analyses of those records reveal, that under the assumption of the same concrete class and the value of prestressing force, the values of basic transmission length calculated according to (11) is bigger than calculated according to (10) by approximately 35% in case of wires and by approximately 75% in case of strands. It should also be noted, that the values of the bond stress depend from various different factors – hence Eurocode 2 (10) recommends to assume for calculation purposes safe values, that could differ from the base transmission length $\pm 20\%$.

3.3. Concrete cracking in the railway sleeper frontal zone

Transfer of the prestressing force on the concrete in the side zone of pre-tensioned railway sleeper results in the formation of the complex, tri-dimensional stress state in concrete, composed from longitudinal compressive stress and transverse tensile stresses. Model Code 2010 (10) defines three different types of cracking in this section of pre-tensioned element, that may have a significant influence on the proper anchorage of tendons in concrete. Those are:

- splitting along the contact surface between tendons and concrete resulted mainly from Hoyer's effect, denoted as 1 in Fig. 8. The example of the splitting of the frontal surface of the railway sleeper is presented in Fig. 9a;
- bursting of the element generated by transverse tensile stresses in concrete denoted as 2 in Fig. 8. Example of such a failure of pre-tensioned railway sleeper, caused by crack resulting from bursting of the element frontal zone is presented in Fig. 9b;
- diagonal cracking of the concrete along the tendon surface caused by the loss of its bond to the surrounding concrete, denoted as 3 in Fig. 8.

Quite frequently, described mechanism superimpose and their



Rys. 8. Schematyczne przedstawienie sił powodujących uszkodzenia strefy czołowej elementu strunobetonowego

Fig. 8. Schematic diagram of the forces causing damages of the frontal zone of pre-tensioned element

3.5. Korozja betonu w podkładach kolejowych

Z początkiem lat osiemdziesiątych wstąpiły masowe uszkodzenia podkładów na liniach kolejowych w Stanach Zjednoczonych w Niemczech. Wiązały się one ze zmianą technologii wytwarzania cementu portlandzkiego, polegającą na przejściu z metody mokrej na suchą. Zmiana ta spowodowała zwiększenie zawartości potasu w klinkierze, który, dzięki wymiennikom cyklonowym, tworzy obieg wewnętrzny w piecu obrotowym. Była to więc korozja wewnętrzna betonu, bowiem powodowały ją składniki zawarte w tym kompozycie.

Tej wewnętrznej korozji betonu poświęcono wiele prac badawczych, wyjaśniając że jest ona spowodowana opóźnionym powstawaniem ettringitu (14-18). Ustalono także jakie są przyczyny tego opóźnionego powstawania ettringitu (15, 18-20). Wydawało się więc, że w oparciu o te prace problem zostanie rozwiązany. Tak się jednak nie stało i masowe uszkodzenia podkładów występują w dalszym ciągu. Na przykład w 2007 roku w Niemczech, na linii kolejowej z Berlina do Monachium trzeba było wymienić aż dwa miliony podkładów (21). Te groźne przypadki, nie tylko ze względów ekonomicznych, lecz szczególnie z punktu widzenia bezpieczeństwa powodują, że trzeba powracać do omówienia zasad, które zapobiegą takim przypadkom.

a)



b)



Rys. 9. Przykładowe uszkodzenia podkładów kolejowych: a) rozszczepienie, b) zniszczenie zainicjowane przez rozrywanie czoła elementu

Fig. 9. Exemplary damages of the railway sleepers: a) splitting, b) damage initiated by bursting of the frontal zone of element

joint effect not only reduces durability, but also may lead to the deterioration of the bond properties of the prestressing reinforcement, and influence the load-bearing capacity of element and crack resistance of the sections located in the direct proximity of the end zone of the sleeper.

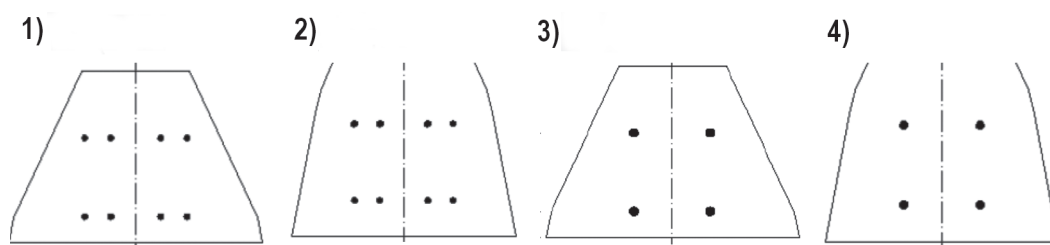
3.4. Experimental investigations of bearing capacity and crack resistance of the sub-rail zone for various types of sleepers

The research on pre-tensioned concrete railway sleepers with different methods of anchorage of the prestressing strands had been conducted at the Cracow University of Technology (12). Chosen methods are known and widely applied in European Union countries. The experimental tests included tests of PS-83 and PS-94, manufactured in listed below technologies, presented schematically in Fig. 10:

- 1) sleeper PS-83, prestressed with eight smooth wires of 7 mm diameter, fixed in the anchorage with button head BBRV system, and massive anchorage plates;
- 2) sleeper PS-94, prestressed with eight smooth wires of 7 mm diameter, fixed in the anchorage with button head BBRV¹ system, and massive anchorage plates;
- 3) sleeper PS-83, prestressed with four profiled bars of 10.7 mm diameter with additional anchorage plate of 30 mm diameter, screwed on the threaded ends of bars;
- 4) sleeper PS-94 prestressed with four indented bars of 9.5 mm, that were anchored only by the bond forces between steel and concrete;

In all tested sleepers, the prestressing force was equal 360 kN.

The tests were conducted with the methods described in EN 13230-2 (12). The code included tests under static and dynamic loads, but also under long term fatigue loading. Results achieved allow to conclude, that the bearing capacity of sleepers in rail seat zone is strongly dependent from the method of the anchoring of the tendons. The biggest failure load occurred in the sleepers with steel anchorage plates. The lowest bearing capacity had the sleepers where profiled bars were bonded with the concrete mainly by forces of adhesion. The difference of bearing capacities amounted up to 36%. The sleepers 3 and 4 had the load capacity up to 23% smaller than sleepers 1 and 2, that was the result [in case of sleeper 3] of the anchorage thread failure, and [in case of sleeper 4] the lack of mechanical anchorage. The application of the indented bars increased the cracking resistance of the sleepers, however the differences between cracking load in the element reinforced with ribbed bars and the one with smooth bars were not significant, and the increase of cracks opening up to 0,05 mm followed practically in the same pattern. The fatigue loading decreased the bearing capacity of the rail seat zone only to a small degree, and it was similar in all tested elements.



Rys. 10. Przekroje badanych podkładów w strefie podszyновой

Fig. 10. The cross-sections of the tested sleepers in the rail seat zone

Podkłady na linii kolejowej ułożone są na podsypce z grysów skalnych, co zmniejsza znacznie możliwość zewnętrznej korozji chemicznej betonu i w zasadzie pozostaje tylko karbonatyzacja [z wyjątkiem obszarów nadmorskich] natomiast z fizycznych najważniejsze znaczenie ma cykliczne zamrażanie i rozmrażanie podkładów w większości krajów świata, w związku z panującym w nich klimatem. Szkodliwy wpływ cyklicznego zamrażania szczególnie potęguje się w przypadku powstania nawet mikrorys w betonie. Rysy te mogą powstać w wyniku opóźnionego powstawania ettringitu, która jest najgroźniejszą dla podkładów wewnętrzną korozją betonu. Natomiast drugi rodzaj korozji wewnętrznej, spowodowanej reakcją wodorotlenków sodu i potasu z aktywną krzemionką w kruszywie wiąże się ze stosowaniem niewłaściwego kruszywa przez producenta podkładów. Jest to więc przypadek wyjątkowy, zdarzający się sporadycznie.

3.6. Opóźnione powstawanie ettringitu

Jak już wspomniano w punkcie 3.5. Heinz i Ludwig (14,15) wykazali, że zniszczenie podkładów było spowodowane opóźnionym powstawaniem ettringitu, natomiast Wieker i in. (16) wyjaśnili przyczyny braku trwałości ettringitu. Były one spowodowane temperaturą obróbki cieplnej betonu, przekraczającą 70°C, gdy równocześnie stężenie sumaryczne wodorotlenków sodu i potasu w roztworze w porach zaczynu przekraczało 400 mmol/L [tablica 1]. W tych warunkach ettringit nie jest trwały i gliniany wapnia występują w formie hydratu C_4AH_{13} . W związku z tym jony siarczanowe pozostają w fazie ciekłej [rysunek 11] i mogą reagować z jonami glinianowymi podczas eksploatacji podkładów w różnych okresach, powodując ekspansję. Czas wystąpienia ekspansji oraz jej wielkość zależą od temperatury obróbki cieplnej betonu [rysunek 12]. Im wyższa jest temperatura tym większa jest ekspansja i krótszy czas jej wystąpienia.

Ekspansja wzrasta także z szybkością narastania wytrzymałości betonu; niestety duża wytrzymałość i szybki jej przyrost stanowią podstawowy warunek w produkcji strunobetonowych podkładów kolejowych.

Jony siarczanowe ulegają adsorpcji w fazie C-S-H i zostają częściowo związane w fazie AFm, która występuje jako nanometryczna mieszanina z fazą C-S-H (22). Towarzyszą mu jony glinianowe i są one substratami reakcji opóźnionego powstawania ettringitu w trakcie eksploatacji betonu (23). Taki jest jeden z mechanizmów

3.5. Concrete corrosion in railway sleepers

Numerous damages of concrete sleepers on railway lines in USA and Germany occurred in early eighties. They were caused by the change in production technology of Portland cement, consisting in the transition from the wet to the dry method. This change caused an increase in potassium content in clinker, which, through the cyclone preheaters, forms inner circuit in rotary kiln system. Thus, it was an internal corrosion of concrete, because it was caused by the components contained in this composite.

Many studies were devoted to this internal concrete corrosion, explaining that it is caused by delayed ettringite formation (14-18). The causes of delayed ettringite formation were also determined (15, 18-20). Thus, it seemed, that based on these works, the problem will be solved. However, it did not happen and mass damages of concrete sleepers still occur. For example, in 2007 in Germany, on railway line from Berlin to Munich, two million concrete sleepers had to be replaced (21). These dangerous cases, not only for economic reasons, but especially from the point of view of safety, cause, that it is necessary to re-discuss the rules, which prevent such cases.

Prestressed concrete sleepers on railway line are placed on the track ballast made of crushed stone, which significantly reduces the possibility of external chemical concrete corrosion and actually only carbonation remains [except the coastal regions], but in terms of the physical, the most important is cyclic freezing and thawing of sleepers in most countries in the world, because of the climate conditions. Harmful effect of cyclic freezing and thawing is compounded even in the case of microcracks formation in concrete. These cracks can be caused by delayed ettringite formation, which is the most dangerous for sleepers internal concrete corrosion. However, the second type of internal corrosion, caused by the reaction of sodium and potassium hydroxides with active silica in aggregate is associated with the usage of improper aggregates by the sleepers producers. Thus, it is exceptional case, occurred occasionally.

3.6. Delayed ettringite formation

As it was mentioned in point 3.5, Heinz and Ludwig (14,15) demonstrated, that the cause of railway sleepers damage was delayed ettringite formation, while Wieker et al. (16) explained the causes of lack of ettringite stability. They were caused by the heat treatment

Tablica 1 / Table 1

UWODNIONE FAZY GLINIANOWE WYSTĘPUJĄCE W RÓWNOWADZE Z ROZTWOREM NaOH W FUNKCJI JEGO STĘŻENIA W RÓŻNYCH TEMPERATURACH

HYDRATED CALCIUM ALUMINATE PHASES IN EQUILIBRIUM WITH NaOH SOLUTION AS A FUNCTION OF ITS CONCENTRATION AT DIFFERENT TEMPERATURE

Stężenie NaOH mmol/l NaOH concentration mmoles/L	Wykryte fazy / Detected phases		
	25°C	75°C	100°C
0	ett.*	Ettringite	Ettringite
400	ett.	Ca(OH) ₂ , C ₄ AH ₁₃	AFm, CaSO ₄ , Ca(OH) ₂
700	ett.	Ca(OH) ₂ , C ₄ AH ₁₃	Ca(OH) ₂ , CaSO ₄
1000	ett.	Ca(OH) ₂ , fazy bezpost. / amorph. phases	C ₃ AH ₆ , Ca(OH) ₂ , CaSO ₄

* ett. – ettringit / ettringite

opóźnionego powstawania ettringitu, który został powszechnie zaakceptowany.

3.7. Obliczenie dopuszczalnej zawartości sodu i potasu w cemencie.

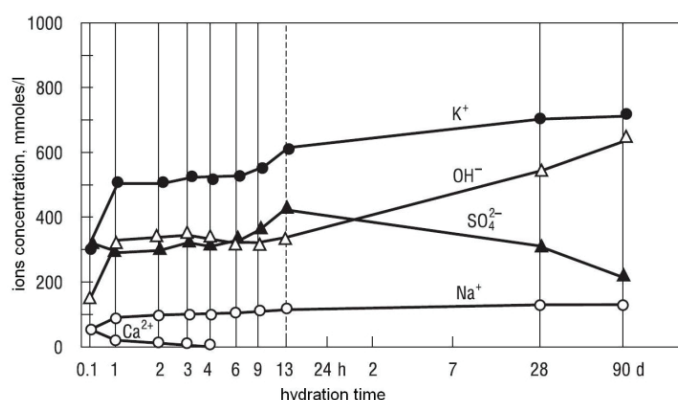
W obliczeniach dotyczących dopuszczalnej zawartości sodu i potasu w cemencie przyjmujemy skład betonu stosowany w zakładach strunobetonowych podkładów, który jest następujący:

- kruszywo grube – granit 1600 kg/m³, zawartość rozpuszczalnego równoważnika sodowego Na₂O_e = 0,02%;
- piasek kwarcowy 600 kg/m³, zawartość rozpuszczalnego Na₂O_e ślady;
- cement 320 kg/m³, zawartość rozpuszczalnego Na₂O_e = 0,5%; sumaryczna 0,6%;
- woda 134,4 kg/m³, w/c = 0,42.

Składniki betonu mogą wprowadzić do roztworu w porach betonu następujące ilości rozpuszczalnego Na₂O_e:

- kruszywo grube 0,32 kg/m³;
- cement [przy założeniu 0,5% rozpuszczalnego Na₂O_e] 1,6 kg/m³.

Daje to sumaryczną zawartość 1,92 kg/m³ Na₂O co odpowiada 1424,5 g Na i 2477,3 g NaOH w 1 m³ betonu. Biorąc pod uwagę zawartość wody wynoszącą 134,4 l/m³ betonu otrzymamy 18,43 g NaOH/L roztworu w porach betonu. Ta zawartość NaOH odpowiada 460,9 mmoli/L roztworu, co przekracza dopuszczalne stężenie oznaczone przez Wiekera (16), w związku z czym ettringit może być nietrwały w procesie obróbki cieplnej, w której temperatura we wnętrzu podkładu betonowego przekroczy 70°C. Z tego względu w wytwórniach strunobetonowych podkładów w Polsce stosuje się cement specjalny CEM I 52,5 NA, w którym zawartość całkowita Na₂O_e wynosi około 0,29%, a rozpuszczalnego 0,14% (24). W związku z tym stężenie NaOH, liczone na podstawie Na₂O_e, wynosi 129 mmoli/L. Przeprowadzenie podobnych rozważań na podstawie stosowanego w Niemczech cementu, który może zawierać 0,8% Na₂O_e, a więc około 0,7% rozpuszczalnego Na₂O_e otrzymamy stężenie wynoszące 645 mmoli/L roztworu w betonie, o założonym składzie. Przekracza to nawet oznaczony przez



Rys. 11. Skład fazy ciekłej w zaczynie z cementu portlandzkiego poddanego obróbce cieplnej w 90°C, a następnie dojrzewającego w wodzie w temperaturze 20°C, w funkcji czasu (16)

Fig. 11. Composition of the liquid phase in Portland cement paste subjected to thermal treatment at 90°C and then cured in water at 20°C, plotted as a function of time (16)

temperature of concrete, exceeding 70°C, when simultaneously the total concentration of sodium and potassium hydroxides in paste pore solution exceeds 400 mmol/L [Table 1]. In these conditions the ettringite is not stable and calcium aluminates occur in the form of C₄AH₁₃. Therefore, the sulphate ions remain in the liquid phase [Fig. 11] and they can react with aluminate ions during sleepers exploitation in different periods, causing the expansion. Time of expansion and its range depend on the heat treatment temperature of concrete [Fig. 12]. Higher temperature causes higher expansion and shorter time of its occurring.

Expansion also increases with the rate of strength development; unfortunately, high strength and rapid strength development are the basic requirements in the production of prestressed concrete railway sleepers.

Sulphate ions are absorbed on the C-S-H gel and they are partly bound in AFm phase, which forms the nanometric mixture with C-S-H phase (22). It is accompanied by the aluminate ions and they are the substrates of delayed ettringite formation, during concrete exploitation (23). This is one of the mechanisms of delayed ettringite formation, which has been widely accepted.

Pawluka (25) poziom 600 mmoli/L roztworu, w przypadku gdy obróbka cieplna betonu wynosi 50°C.

Sytuacja ta ulega radykalnemu pogorszeniu gdy stosujemy mniej-
szy w/c w produkowanym strunobetonie. Obliczenia porównawcze dla przypadku, w którym zawartość wody wynosi 128 l, co odpowiada w/c 0,40 i 122 l, w/c = 0,39 dla obu betonów, w których rozpuszczalne Na_2O_e wynosiło odpowiednio 0,5% i 0,7% pokazano w tablicy 2.

Obliczone zawartości rozpuszczalnego Na_2O_e w cemencie podane w kolumnie 3 tablicy 2 pokazują, że są one mniejsze od przyjętych dla cementów, które mają odpowiednio 0,6% i 0,8% całkowitego Na_2O_e . Przeprowadzone doświadczenia wykazują, że te zawartości zapewniają trwałość ettringitu w temperaturach obróbki betonu nie przekraczających odpowiednio 70°C i 50°C.

W celu zapewnienia trwałości ettringitu w trakcie obróbki cieplnej podkładów należy mierzyć temperaturę we wnętrzu podkładów i zapewnić jej automatyczne utrzymanie na odpowiednim poziomie, na przykład przez podawanie pary wodnej do komory, w której odbywa się proces. Równocześnie trzeba sprawdzać obliczeniowo ile składniki betonu dostarczają sodu i potasu do roztworu w porach betonu, w oparciu o oznaczone zawartości tych pierwiastków rozpuszczalnych w wodzie w kruszywie i w cemencie, aby zachować ich odpowiedni poziom w roztworze w porach betonu.

Takie zawartości rozpuszczalnego Na_2O_e zabezpieczają nawet beton przed reakcją tych wodorotlenków z krzemionką w kruszywie, co wykazali Oberholster i in. (26). Jest to zabezpieczenie przed pomyłką producenta betonów, który zastosował niewłaściwe kruszywo.

4. Podsumowanie i wnioski

Wszystkie znajdujące się obecnie na rynku podkłady kolejowe spełniają wymagania normowe lecz poszczególne rozwiązania nie zapewniają takiej samej trwałości elementów strunobetonowych. W wyniku niejednakowych mechanizmów przekazywania siły sprężającej na beton uzyskuje się różne długości transmisji, co wpływa na pracę podkładu w strefie podszynowej.

Analiza obliczeniowa wykazała, że w przypadku przekazania siły sprężającej na beton jedynie przez więzy przyczepności, a brak dodatkowych elementów kotwiących, podstawowa długość transmisji jest na tyle duża, że w najbardziej obciążonym przekroju podszynowym tylko część siły sprężającej jest przekazywana na beton. W wyniku tego zmniejszeniu ulega nośność i odporność podkładu na powstawanie rys. Z tego punktu widzenia zalecane jest stosowanie dodatkowego mechanicznego kotwienia cięgien. Badania doświadczalne pokazały, że najlepszy efekt uzyskuje się stosując zakotwienia główkowe drutów sprężających [BBRV], które stanowi podstawę technologii przyjętej w zakładach podkładów strunobetonowych w Polsce. Natomiast stosowanie płytek kotwiących nakręcanych na pręty okazało się nie w pełni skuteczne z uwagi na przedwczesne zniszczenie gwintu. Wyniki doświadczeń

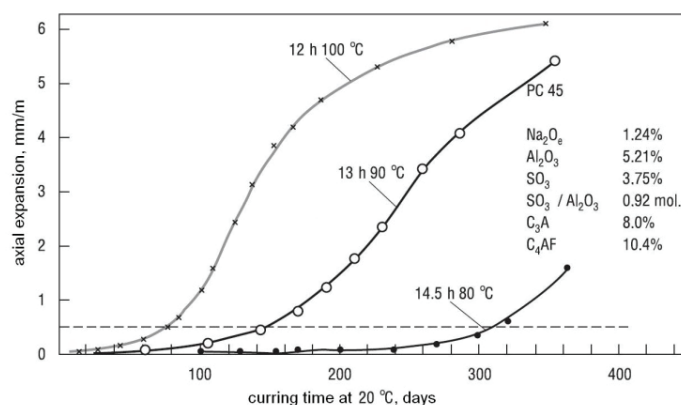


Fig. 12. Expansion of mortars from Portland cement with $\text{Na}_2\text{O}_e = 1.24$, subjected to thermal treatment at different temperatures (time of curing given on the plots), and subsequently matured at humid atmosphere at temperature of 20°C (16)

Rys. 12. Ekspansja zapraw z cementu portlandzkiego zawierającego $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,24$, poddanych obróbce cieplnej w różnych temperaturach [zaznaczono czas obróbki], a następnie dojrzewających w wilgotnej atmosferze w temperaturze 20°C (16)

3.7. Calculation of permissible sodium and potassium content in cement

In calculation concerning the permissible content of sodium and potassium in cement, the concrete composition used in plants of prestressed railway sleepers, is as follows:

- coarse aggregate – granite 1600 kg/m³, content of soluble sodium equivalent $\text{Na}_2\text{O}_e = 0.02\%$;
- quartz sand 600 kg/m³, content of soluble Na_2O_e traces;
- cement 320 kg/m³, content of soluble $\text{Na}_2\text{O}_e = 0.5\%$; total 0.6%;
- water 134.4 kg/m³, w/c = 0.42.

Concrete components can introduce to the concrete pore solution the following amounts of soluble Na_2O_e :

- coarse aggregate 0.32 kg/m³;
- cement [assuming 0.5% of soluble Na_2O_e] 1.6 kg/m³.

It gives total content of $\text{Na}_2\text{O} = 1.92 \text{ kg/m}^3$, which corresponds to 1424.5 g of Na and 2477.3 g of NaOH in 1 m³ of concrete. Considering the water content amounting 134.4 l/m³ of concrete we will obtain 18.43 g of NaOH/L of concrete pore solution. This content of NaOH corresponds to 460.9 mmoles/L of solution, which exceeds permissible concentration determined by Wieker (16), therefore ettringite can be unstable during the heat treatment process, in which the temperature inside concrete sleeper will exceed 70°C. For this reason, special cement CEM I 52,5 NA, in which total Na_2O_e content is about 0.29%, and soluble about 0.14% is used in plants of prestressed railway sleepers in Poland (24). Therefore, NaOH concentration, calculated based on Na_2O_e , equals 129 mmoles/L. Conducting similar considerations based on cement using in Germany, which can contain 0.8% of Na_2O_e , thus about 0.7% of soluble Na_2O_e gave concentration equals 645 mmoles/L of concrete pore solution, with established composition. It even exceeds the value

Tablica 2 / Table 2

WPŁYW W/C NA WYMAGANE STĘŻENIE NaOH WYNOSZĄCE 400 I 600 mmol/L¹

THE INFLUENCE OF W/C RATIO ON REQUIRED CONCENTRATION OF NaOH AMOUNTING 400 AND 600 mmoles/L¹

Na ₂ O _e rozp. w cemencie Na ₂ O _e soluble in cement	w/c	NaOH ² mmol/L	Na ₂ O _e ³
0,5	0,42	461	0,43
0,5	0,40	484	0,41
0,5	0,39	507	0,39
0,7	0,42	645	0,65
0,7	0,40	677	0,62
0,7	0,39	694	0,60

Uwagi / Remarks:

¹ Stężenia te odnoszą się do temperatur 70°C i 50°C / These concentrations refer to temperatures of 70°C and 50°C

² Stężenia w mmol/L dla zawartości Na₂O_e w cemencie wynoszącej 0,5% i 0,7% / Concentrations in mmoles/L for contents of Na₂O_e in cement amounting 0.5% and 0.7%

³ Zawartość Na₂O_e rozpuszczalnego w cemencie zapewniająca uzyskanie 400 i 600 mmol NaOH/L / Content of Na₂O_e soluble in cement providing 400 and 600 mmoles of NaOH/L

wykazały, że nośność strefy podszynowej podkładów sprężonych z wykorzystaniem technologii BBRV jest największa i przekracza nośność pozostałych podkładów nawet o około 36%.

Podkłady strunobetonowe ułożone są na podsypce z grysu i w związku z tym nie są narażone na korozję zewnętrzną. Wyjątek stanowią obszary nadmorskie, w których podkłady są narażone na korozję spowodowaną kroplami wody morskiej. Natomiast, ponieważ w technologii produkcji strunobetonu, stosowana jest obróbka cieplna może występować ich zagrożenie korozją wewnętrzną. Najważniejszą z nich jest opóźnione powstawanie ettringitu.

Zabezpieczenie strunobetonu przed niebezpieczeństwem korozji wewnętrznej w postaci opóźnionego ettringitu wymaga stosowania cementu o małej zawartości rozpuszczalnych w wodzie związków sodu i potasu. W przypadku stosowania obróbki cieplnej w temperaturze nie przekraczającej 70°C we wnętrzu strunobetonowego podkładu, zawartość rozpuszczalnych w wodzie tych pierwiastków, wyrażonych w postaci ekwiwalentu sodowego Na₂O_e nie powinna przekraczać 0,43%. W przypadku obróbki w 50°C zawartość ta nie powinna przekraczać 0,65%. Te wielkości odnoszą się do betonu, w którym zawartość cementu wynosi 320 kg/m³, a w/c jest równe 0,42. W przypadku zmiany składu betonu i w/c należy te wielkości przeliczyć w taki sposób aby zapewniały one stężenia NaOH, wyliczone z Na₂O_e, wynoszące odpowiednio 400 mmol/L i 600 mmol/L w temperaturach obróbki 70°C oraz 50°C.

Literatura / References

1. Neville A.M. Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków, 2000
2. Hosseini S.J.A. et al. Zagadnienie przyczepności w betonie zbrojonym, przegląd stanu wiedzy. Cement Wapno Beton, **81**, pp. 93-105 (2014).

of 600 mmoles/L of solution, determined by Pawluk (25), in the case when the heat treatment of concrete equals 50°C.

This situation is dramatically worse, when lower w/c ratio is used in produced prestressed concrete. Comparative calculations for the example, in which the water content is 128 l, and which corresponds to w/c ratio of 0.40 and 122 l, w/c = 0.39 for both concretes, in which soluble Na₂O_e were 0.5% and 0.7%, respectively, are shown in Table 2.

Calculated contents of soluble Na₂O_e in cement, given in third column of Table 2, are showing, that they are lower than taken for cements, which contain 0.6% and 0.8% of total Na₂O_e, respectively. Conducted experiments were showing, that contents presented in fourth column of Table 2 provide the ettringite stability at temperature of heat treatment not exceeding 70°C and 50°C, respectively.

In order to ensure the ettringite stability during the heat treatment of concrete sleepers, temperature inside sleepers should be measured, and its automatic maintenance at appropriate level should be provided, for example through introduction of water vapour to the chamber, in which the process takes place. Simultaneously, it should be checking by calculations how much sodium and potassium is introduced to concrete pore solution by concrete components, based on determined contents of these elements soluble in water in aggregate and in cement, to maintain their appropriate level in concrete pore solution.

Those low content of soluble Na₂O_e even protect concrete against reaction of these hydroxides with silica in aggregate, which Obeholster et al. were established (25). It is protection against mistake of concrete manufacturer, which used inappropriate aggregate.

4. Summary and conclusions

All types of railway pre-tensioned concrete sleepers available on the market fulfill the code requirements, however, several technological solutions do not guarantee the same level of element durability. As a result of non-uniform prestressing transmission mechanisms, sleepers have different transmission lengths, that influence the behavior of elements in rail seat zone.

Analytical analysis demonstrated that in the case of the transfer of prestressing force to the concrete by the adhesion forces only and the lack of any additional anchoring devices, the basic value of transmission length is large enough, that in the rail seat cross-section only part of the prestressing force is transferred to the concrete. That results in decreasing of bearing capacity and cracking resistance of the railway sleeper. That is the reason, that applying additional mechanical anchorage of the tendons is highly recommended. Experimental researches demonstrated, that the most advantageous effect is obtained applying button head anchorages of prestressing wires [BBRV], that is the basic technology employed in manufacturing plant of TrackTec. Application of the anchorage plates was proved not equally efficient, due to premature failure of threads. The results of experimental tests showed

3. Hosseini S.J.A. et al. Zagadnienie przyczepności w betonie zbrojonym, przegląd stanu wiedzy, część druga. *Cement Wapno Beton*, **81**, pp. 384-395 (2014).
4. Pinchin D.J. Tabor D., *Cem.Concr.Res.*, **8**, p. 15 (1978).
5. Bolomsvik R., Lundgren K., *Modeling of bond between three-wire strands and concrete*. Magazine of Concrete Research, April 2006, pp. 123-133.
6. Stroeve P., de Wind G., *Structural and mechanical aspects of debonding of a steel bar from cementitious matrix*. Bond in Concrete. Applied Science Publishers, 1982, pp. 40-50.
7. Russell B.W., Burns N.H., Design guidelines for transfer, development and debonding of large diameter seven wire strands in pretensioned concrete girders. Austin: University of Texas, Report No. 1210-5F, 1993.
8. Hoyer E., Friedrich E. Beitrag Zur Frage der Hafspannung in Eisenbetonbauteilen, *Beton und Eisen*, Berlin, 1939 (Vol. 38, No. 6), pp. 107-110
9. Hegger J., Bertram G. Verbundverhalten von vorgespannten Litzen in UHPC – teil 1: Versuche zur verbundfestigkeit und übertragungslänge. *Beton und Stahlbeton*, 2010, 105(6), pp. 379-389.
10. EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2008
11. fib Bulletin 65 and 66. Model Code for Concrete Structures 2010, FIB, 2012
12. Derkowski W., Słyś B., Szmit M. Effect of strands anchorage system in railway sleepers on behaviour of its rail seat zone, *ACEE*, No 1/2015, pp. 61-67
13. EN 13230-2:2009 Railway applications — Track — Concrete sleepers and bearers. Part 2: Prestressed monoblock sleepers, 2009
14. Heinz D., Ludwig U., 8th ICCO Rio de Janeiro, vol. V, p. 189, Rio de Janeiro 1986.
15. Heinz D., Ludwig U., Rudger L., *Concrete Pecasting Plant and Technology*, **11**, 56 (1989).
16. Wieker W., Herr R., Schubert H., Proc. Int. Coll. Corrosion of Cement Paste, Mogilany 16–17 November (ed. W. Kurdowski), p. 3, Kraków 1994.
17. Kelham S., *Cem. Contr. Composites*, **18**, 171 (1996).
18. Kelham S. 10th ICCO Göteborg, vol. IV, paper 4IV059, Göteborg 1997.
19. Wieker W., Scrivener K. L., 9th ICCO New Delhi, vol. I, p. 449, New Delhi 1992.
20. Glasser F. P., Damidot D., Atkins M., *Adv. Cem. Res.*, **26**, 57 (1995).
21. Schmitt J., Pfusch am Gleis, *Der Spiegel* 10/2008.
22. Taylor H.F.W., 8th ICCO Rio de Janeiro, vol. I, p. 83, Rio de Janeiro 1986.
23. Famy C., PhD Thesis, Imperial College, Materials Department, London 1999.
24. Pawluk J. Znaczenie sodu i potasu w klinkierze portlandzkim, *Cement Wapno Beton*, **83**, 20 (2016).
25. Pawluk J. Zagrożenie korozyjne podkładów kolejowych część I, *Cement Wapno Beton* **81**, 174 (2014), część II, **81**, 223 (2014).
26. Oberholster R. E., Wan Aardt J. H. P., Brandt M. P., w „Structure and Performance of Cements” (ed. P. Barnes), p. 365, Appl. Science Publ., London 1983.

that the bearing capacity of the rail seat zone of the pre-tensioned railway sleepers, where the BBRV technology was adopted, was higher among tested elements, even up to 36%.

Prestressed concrete sleepers are placed on the track ballast made of grits and therefore they are not exposed to external corrosion. The exception are coastal regions, in which concrete sleepers are exposed to corrosion caused by drops of sea water. However, there is a risk of internal corrosion, because the heat treatment is used in production technology of prestressed concrete. The most important of them is delayed ettringite formation.

Protection of concrete against internal corrosion in the form of delayed ettringite formation requires the usage of cement with low content of sodium and potassium compounds, soluble in water. In the case of heat treatment at temperature not exceeding 70°C inside the prestressed concrete sleeper, the content of these elements soluble in water, expressed as sodium equivalent Na_2O_e , should not exceed 0.43%. In the case of heat treatment at 50°C that content should not exceed 0.65%. These values refer to concrete, in which cement content is 320 kg/m³ and w/c ratio equals 0.42. In the case of the change of concrete composition and w/c ratio, these values should be calculated in such a way to ensure the concentration of NaOH, calculated from Na_2O_e , amounting 400 mmoles/L and 600 mmoles/L at treatment temperatures of 70°C and 50°C, respectively.

In order to ensure the ettringite stability during the heat treatment of concrete sleepers, temperature inside sleepers should be measured, and its automatic maintenance at appropriate level should be provided, for example through introduction of water vapour to the chamber, in which the process takes place. Simultaneously, it should be checking by calculations how much sodium and potassium is introduced to concrete pore solution by concrete components, based on determined contents of these elements soluble in water in aggregate and in cement, to maintain their appropriate level in concrete pore solution.

Those low content of soluble Na_2O_e even protect concrete against reaction of these hydroxides with silica in aggregate, which Oberholster et al. were established (26). It is protection against mistake of concrete manufacturer, which used inappropriate aggregate.