

Biobeton – materiał budowlany przyszłości?

Bioconcrete - the building material of the future?

Słowa kluczowe: samoleczenie betonu, bakterie strącające CaCO₃

Key words: sealfhealing of concrete, bacteria producing CaCO₃

1. Wstęp

Opracowanie skutecznej metody naprawy mikropęknięć betonu od lat nurtuje naukowców i pracowników branży budowlanej. Beton, ze względu na swoje właściwości, powszechną dostępność i trwałość, jest używany w budownictwie indywidualnym oraz przemysłowym, w każdym klimacie. Zasadniczą wadą tego materiału jest jego podatność na powstawanie mikropęknięć (1). Mikropęknięcia powstają już w trakcie twardnienia masy betonowej i są uważane za typową właściwość betonu. Normy dopuszczają występowanie mikropęknięć o rozwarciu mniejszym od 0,2 mm, które w przypadku żelbetu nie zagrażają wystąpieniu korozji stali w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Jednak ich powstanie wraz z upływem czasu sprzyja korozji betonu spowodowanej agresywnymi roztworami, przede wszystkim chlorków i siarczanów, co prowadzi do szybszego zniszczenia materiału, oraz powstawania nowych, znacznie większych rys. Od lat prowadzone są badania nad znalezieniem betonu samoleczącego uszkodzenia i dopiero wykorzystanie w tym celu bakterii pozwoli prawdopodobnie uzyskać duży postęp w tym kierunku (2).

Odkrycie Jonkersa (2) dotyczące wykorzystania bakterii do renowacji powierzchni betonowych, miało znaczenie przełomowe. Bakterie, jako mikroorganizmy jednokomórkowe mające zdolność do przeżycia w najbardziej skrajnych warunkach środowiska, mogą okazać się skuteczną metodą zwiększenia odporności korozyjnej betonu. Dotychczas traktowano mikroorganizmy jako bardzo niekorzystne dla betonu, wiążąc je z biokorozją i biodegradacją (3-5). Dlatego wykorzystanie szczególnych właściwości bakterii do naprawy betonu stanowiło innowację na skalę światową.

2. Bakterie a biobeton

Prace naukowe na temat trwałości betonu wykazują, że mikropęknięcia powstające w konstrukcjach, mogą być, w niektórych przypadkach, naprawiane za pomocą tak zwanego „samoleczenia”. W znacznym stopniu związane to jest ze składem betonu –

1. Introduction

Researchers and construction workers have been trying to find an effective method of repairing microcracks in concrete from a long time. Concrete, due to its properties, accessibility and durability, is used in houses building and industrial constructions, practically in every climate. The main disadvantage of this material is its susceptibility to cracking (1). Microcracks are already formed during hardening of the concrete and they are considered as a general feature of concrete. The standards allow for the occurrence of microcracks to the opening of 0.2 mm, which do not present the reinforcement corrosion hazard in normal conditions of concrete exploitation. However, their occurrence promotes corrosion of concrete, caused by the aggressive solutions attack, principally of chlorides and sulfates and acids, what leads to faster material destruction and the formation of new, much larger cracks. The researches have been conducted for years on finding self-healing concrete and only the use of bacteria for this purpose has made the substantial step in this direction (2).

The discovery of Jonkers (2) for application of bacteria for the renovation of concrete surfaces has the crucial importance. Bacteria can be the effective remedies for the concrete corrosion, due to its ability to survive under the most extreme environmental conditions. The microorganisms were, so far, perceived as very unfavorable for concrete as associated with the phenomena of its biocorrosion and biodeterioration (3-5). Therefore, the use of specific properties of bacteria for the repair of concrete is a worldwide innovation.

2. Bacteriae and bioconcrete

The scientific papers on the concrete durability indicate that the microcracks formed in the concrete structures can be repaired in some cases by self-healing. To a large extent it is related with composition of the concrete mix - higher cement content increases the possibility of self-healing, what is caused by the presence of some un-hydrated cement particles in concrete. Such a self-healing is only possible in the case of microcracks with the opening of up to

większa zawartość cementu zwiększa możliwości samoleczenia, co spowodowane jest występowaniem w betonie pewnej zawartości nieuwodnionych ziaren cementu. Niemniej jednak, takie wypełnianie rys dotyczy mikropęknięć o rozwarości do 50 µm (31). Normy dopuszczają występowanie mikropęknięć o rozwarciu mniejszym od 0,2 mm, co już wyjaśniono. W przypadku większych pęknięć, nie mogą one ulec wypełnieniu w wyniku samoleczenia, co związane jest ze zmniejszeniem objętości mieszaniny cementu z wodą w wyniku hydratacji (1, 6, 7). Ponadto światowe tendencje zakładają ograniczanie zawartości cementu w betonie, ze względu na dużą emisję dwutlenku węgla związaną z produkcją klinkieru portlandzkiego (8). Wiele laboratoriów pracuje obecnie nad opracowaniem składu betonu, który nie tylko będzie miał odpowiednie właściwości, ale również zdolność do samoleczenia, zachowaną przez długi okres, przy jednoczesnym pozytywnym wpływie na środowisko w trakcie jego produkcji.

Jonkers (2), mikrobiolog z Uniwersytetu w Delft, opracował metodę naprawiania mikropęknięć betonu, przy wykorzystaniu właściwości bakterii z rodzaju *Bacillus* sp. [zgłoszenie patentowe US 8460458 B2]. Materiał budowlany opracowany przez niego, tak zwany biobeton, zawiera w swym składzie spory bakterii, które przy określonej wilgotności i dostępności substancji odżywczych mogą się uaktywnić i w wyniku metabolizmu prowadzić do naprawy uszkodzeń betonu (9). Jonkers (2), rozważając możliwości naprawy konstrukcji, wysunął hipotezę stworzenia materiału, który ulegałby „samoleczeniu”, na takiej zasadzie jak zrastanie złamanych kończyn. Należało znaleźć mikroorganizmy, których metabolizm prowadziłby do powstawania związku, który mógłby pełnić funkcję spoiwa w przypadku betonu. Taką substancją jest węglan wapnia, wytwarzany przez niektóre gatunki bakterii, w określonych warunkach środowiska (9, 10). Mikroorganizmy mogą wytwarzać węglany za pomocą trzech mechanizmów. Pierwszy, związany jest z kataboliczną redukcją siarczanów, wywołaną przez bakterie redukujące siarczany w warunkach beztlenowych. W drugim, strącanie węglanów związane jest z rozkładem kwasów organicznych. Trzeci dotyczy rozkładu mocznika przez bakterie ureolityczne i właśnie ten mechanizm ma największe szanse wykorzystania w przypadku betonu (10-12). Mechanizm powstawania węglanu wapnia wykorzystujący mikroorganizmy został nazwany „mikrobiologicznie indukowanym strącaniem węglanu wapnia”, w oparciu o nazwę angielską (13). Wybór odpowiedniego gatunku bakterii nie był łatwy. Oprócz zdolności do strącania CaCO₃ ważną była również zdolność do zachowania żywotności w bardzo zasadowym, praktycznie pozbawionym substancji odżywczych środowisku, jakim jest beton. Wybrany gatunek powinien również wytwarzać spory, bo tylko w tej formie jest możliwe wprowadzenie go do mieszanki, z jednoczesnym zachowaniem żywotności. W swoich badaniach Jonkers (2) brał pod uwagę kilka gatunków bakterii, w tym: *Bacillus pseudofirmus* i *Bacillus cohnii*. Ważnym czynnikiem wyboru mikroorganizmu było jego bezpieczeństwo biologiczne. Oba te gatunki nie stanowią zagrożenia dla ludzi, ponieważ nie mogą zachować żywotności poza zasadowym środowiskiem betonu. Ponadto mają zdolność do wytwarzania przetrwalników i węglanu wapnia, a jednocześnie zużywają tlen, co zapobiega wewnętrznej

50 µm (31), bigger cracks don't have these capabilities. It is related to the limited expansive potential of the non-hydrated cement particles (1, 6, 7). In addition, world trends tend to limit the amount of cement in concrete, due to high carbon dioxide emission, related to the production of cement (8). Therefore, many laboratories are currently working on finding the concrete, which have very good properties for the building industry, but also the self-healing ability for a long time and positive impact on the environment, during their production and exploitation.

Dr Jonkers, microbiologist from Delf University, has found the method for concrete microcracks repairing, using the *Bacillus* sp. bacteria (Patent application US 8460458 B2). His product – bioconcrete include bacteria spores, which could become active in specific conditions [humidity and nutrient accessibility] and will start their metabolism, leading to repair of damage in concrete (9).

What does this phenomenon rely on? Dr Jonkers, considering the possibility of building repairs, came up with the idea of creating the material, which have self-healing properties such as the coalescence of broken limbs. He had to find the microorganisms, whose metabolic activity would lead to the formation of compounds, which could play a role of binder in concrete. Calcium carbonate is such type of compounds and it is produced by certain species of bacteria under specified environmental conditions (9, 10). Microorganisms can cause the formation of carbonates by three mechanisms. First of them is linked with katabolic sulfate reduction, caused by sulphate-reducing bacteria under anaerobic condition. Second mechanism consists of calcium carbonate precipitation, related with the organic acids decomposition. The third is caused by decomposition of urea, caused by ureolytic bacteria. This third mechanism has the greatest application potential (10-12). Such methodology, using bacteria properties, was named as *Microbially Induced Calcium-Carbonate Precipitation* (MICCP) (1).

Finding the right species of bacteria was not an easy step. In addition to the precipitation of CaCO₃, ability to life in strongly alkaline and poor in nutrient components environment was very important. The selected species had also to produce spores, because only this form of organism can be introduced into concrete mixture, preserving their vitality.

In his research Jonkers examined a few species of bacteria, including *Bacillus pseudofirmus* and *Bacillus cohnii*. The biological safety was an important factor of bacteria choice. Both species do not pose a threat to people, because they can't survive outside of the alkaline environment of concrete. Therefore this species have the ability to produce spores and precipitation of calcium carbonate. At the same time they consume oxygen, which prevents the internal corrosion of concrete reinforcements. *Bacillus sphaericus* and *Bacillus pasteurii* (*Sporosarcina pasteurii*) are the other possible usable species, which have been shown to be effective by various authors (12, 14-17).

During testing, bacteria spores were introduced into the concrete mix with the appropriate source of food. The yeast extract, peptone,

korozji zbrojenia betonu. Inne możliwe do zastosowania gatunki, których skuteczność wykazano w badaniach różnych autorów, to *Bacillus sphaericus* (12, 14) i *Bacillus pasteurii* (15); ta ostatnia w nowszej taksonomii znana również pod nazwą *Sporosarcina pasteurii* (16, 17).

W trakcie badań do mieszanki betonowej wprowadzano zarodniki bakterii z odpowiednią pożywką. Były to: ekstrakt drożdżowy, pepton, octan wapnia lub mleczan wapnia. Wykazano, że bakterie w betonie zachowały zdolność do wytwarzania substancji nieorganicznych i w trakcie metabolizowania dostępnych źródeł węgla w środowisku zasadowym powstają jony węglanowe, które reagują z jonami wapnia zawartymi w fazie ciekłej betonu. Stężenie jonów węglanowych jest największe w bezpośrednim sąsiedztwie komórek bakterii i w tych mikroobszarach strąca się węglan wapnia.

Ważna była również ocena wpływu bakterii i dodawanej substancji odżywczej na właściwości betonu. Przeprowadzone przez zespół Jonkera (2) badania wykazały znaczny spadek wytrzymałości betonu na ściskanie, jeśli do mieszanki betonowej dodawano ekstrakt drożdżowy, pepton lub octan wapnia. Natomiast, zastosowanie mleczanu wapnia, jako źródło jonów kwasu węglowego, spowodowało wzrost wytrzymałości betonu o 10% w stosunku do próbek wzorcowych (9, 18). Z kolei doświadczenia Abo-El-Eneina i in. (19) wykazały poprawę właściwości betonu, w tym jego wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości, przy zastosowaniu bakterii, których aktywność metaboliczna powodowała strącanie CaCO_3 . Stwierdzono zależność pomiędzy nasiąkliwością, a ilością komórek bakteryjnych w zaprawie. Większa zawartość zmniejszała nasiąkliwość betonu. Wytrzymałość na ściskanie zwiększała się wraz ze wzrostem udziału bakterii do 1 OD [ang. *Optical Density*, gęstość optyczna]. Powyżej tej zawartości wytrzymałość na ściskanie stopniowo malała. Dlatego autorzy rekomendują stosowanie zaprawy zawierającej 1 OD bakterii, jako najlepiej wpływającej na właściwości betonu, a zarazem zapewniającej zachodzenie procesów samoleczenia (19). Podobne wyniki otrzymali Achal i in. (20) oraz Harshali i in. (21), którzy również stwierdzili wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie oraz mniejszą przepuszczalność po zastosowaniu mieszanki zawierającej mikroorganizmy. W przypadku dodatku bakterii *Bacillus megaterium* do betonu, w którym część cementu zastąpiono popiołem lotnym, właściwości betonu również się poprawiły (22).

Ważnym zagadnieniem jest metoda immobilizacji bakterii w betonie. Proponowanymi rozwiązaniami są: zastosowanie piasku (15), hydrofilowego poliuretanu (17) lub szklanych, porowatych kulek. W przypadku wszystkich trzech metod dochodziło do immobilizacji komórek bakterii na ziarnach nośnika, przy czym w przypadku szklanych kulek zawartość bakterii była największa (23). Ważnym problemem jest aktywacja przetrwalników bakterii w określonym czasie w trakcie eksploatacji betonu, kiedy doszło do powstania mikropęknięć na jego powierzchni. Aktywność metaboliczna nie powinna występować w trakcie wytwarzania mieszanki betonowej i jej formowania. Dlatego, spory bakterii powinny być umieszczone w odpowiedniej „otoczcze”, która będzie zapobiegała przedwczesnej aktywności komórek. Założenia idei biobetonu opierają się

calcium acetate or calcium lactate were used for this purpose. It has been shown that bacteria embedded in cement concrete have the ability to produce inorganic compounds. The carbonate ions were produced by cells in alkaline conditions. These ions react with calcium ions, which are forming saturated solution in the concrete liquid phase. The concentration of produced carbonate ions was high in the immediate vicinity of the cells and in these places the calcium carbonate was precipitated.

The evaluation of the effect of bacteria and nutrient on the properties of concrete was also very important. The research conducted by Jonkers' team showed a significant decrease in compressive strength of concrete, if the yeast extract, peptone or calcium acetate was added to the concrete mix. Whereas if the calcium lactate was added as a source of carbon, the strength of concrete was increase by 10% in comparison with control samples (9, 18). In turn, the experiences of Abo-El-Enein et al. (19) clearly demonstrated the improvement of physical properties of concrete, including its compressive strength and water absorption, thanks to the use of a mortar with bacteria, which metabolic activity resulted in precipitation of CaCO_3 . Correlation between water absorption and bacterial cell concentration in cement mortar was significant; higher concentration of cells resulted in water absorption reduction. Whereas compressive strength increased with cell concentration up to 1 OD (*Optical Density*), above this concentration the strength was gradually decreasing. Therefore, the researchers recommend the use of mortar containing 1 OD of bacteria as the most favorably affecting the parameters of the concrete and self-healing processes (19). Achal et al. (20) and Harshali et al. (21) had also the same results, they also observed the increase of compressive strength of concrete and lower penetration of water after application of mixture with microorganism. The results of research on the use of *Bacillus megaterium* in concrete with the fly ash addition were also interesting. Also in this case, the properties of the concrete have been improved (22).

Immobilization of bacteria in concrete can be attained in a variety of ways and using a variety of materials. The possibilities of introducing innovative techniques are very large and provide a large field of activities for researchers and entrepreneurs. Some of authors propose to apply sand (15), hydrophilic polyurethane (17) or porous glass pellets. For all three methods, immobilization of bacterial cells on the particles of the carrier was achieved; in the case of glass pellets the concentration of bacteria was the highest (23). However, a significant problem is the activation of spores only at a certain period of concrete exploitation, when the microcracks on the concrete surface were formed. Metabolic activity should not occur during the concrete mixture production and its placing. Therefore, the bacteria spores should be placed in special sheath, which will prevent premature cell activity. The assumptions of the idea of bioconcrete action are based, inter alia, on the appearance of the water in their environment. The spores, encapsulated in microcapsules and bioconcrete, are cut off from the outside environment and are in a dormant state. When the microcracks are formed in the concrete, the water transport is easy to occur and

między innymi na pojawieniu się w tym środowisku wody. Spory zamknięte w mikrokapsułkach i biobetonie, są w pewnym sensie odcięte od środowiska zewnętrznego i pozostają w uśpieniu. Kiedy w betonie pojawiają się mikropęknięcia, dostaje się do nich woda i zwiększa się wilgotność betonu. Mikrokapsułki poddane działaniu wody ulegają powolnemu rozpuszczeniu, dzięki czemu mogą być aktywowane przetrwalniki. Procesy metaboliczne komórek bakterii powodują powstawanie węglanu wapnia i powolne wypełnianie powstałych mikropęknięć. Wyraźne efekty są widoczne już po 3 tygodniach (18).

Ważnym problemem jest również utrzymanie żywotności przetrwalników w betonie. W środowisku zewnętrznym spory bakterii mogą przetrwać długi czas, nawet do 50 lat, bez utraty żywotności. Beton wpływa jednak niekorzystnie na żywotność przetrwalników. Wykazano, że spory umieszczone bezpośrednio w betonie w krótkim czasie, do 2 miesięcy, traciły swoją żywotność. Zjawisko to może być spowodowane dużym pH oraz hydratacją cementu, co prowadzi do zmniejszenia porów mniejszych od $1\ \mu\text{m}$, a więc takich, które są mniejsze niż wielkość sporów (2, 9). Zastosowanie specjalnej otoczki, na przykład w formie cząstek gliny lub mikrokapsulek melaminowych, pozwala zwiększyć czas żywotności przetrwalników, dzięki czemu również sam biobeton będzie miał swoje samoleczące właściwości przez dłuższy czas (2, 24, 25). Wang i in. (24) opracowali metodę opierającą się na procesie polikondensacji, w trakcie której spory zostają zamknięte w mikrokapsułkach zbudowanych z melaminy, o rozmiarze około $5\ \mu\text{m}$ [zgłoszenie patentowe nr WO 2014131913 A1]. Końcowym efektem tej metody jest powstanie zawiesiny składającej się z mikrokapsulek i wody, przy czym zawartość sporów wynosiła około 100 komórek/g suchej masy mikrokapsulek. Autorzy wykazali również przydatność otrzymanej emulsji do usuwania mikropęknięć betonu, jednocześnie stwierdzając, że czynnikiem niezbędnym do zachodzenia tego procesu jest występowanie wody w otoczeniu (24).

W celu ochrony komórek bakterii można zastosować również żel krzemionkowy (26). Materiał ten będzie chronił bakterie przed wysokim pH, dzięki czemu będzie przedłużał ich żywotność. Jednocześnie aktywność bakterii zapewnia strącanie węglanu wapnia w mikropęknięciach i ich wypełnianie (10, 26).

Samoleczący się beton zaproponowany przez Jonkersa (2), zawierał małe [2-4 mm] spienione cząstki złożone z minerałów ilastych. Cząstki te, zawierały przetrwalniki 6 gatunków bakterii *Bacillus* w ilości $1,7 \cdot 10^5$ w jednym gramie cząstek ilastych, co odpowiadało $5 \cdot 10^7$ spor na $1\ \text{dm}^3$ betonu. Dodatkowo dodawano około 5% mleczanu wapnia jako pożywki. Ważnym etapem w tej metodzie było suszenie składników ilastych przed połączeniem ich z materiałem biologicznym, w celu zapobiegania występowaniu wilgoci w otoczeniu spor. Autor (2) wykazał dobre właściwości tak przygotowanej mieszanki betonowej w stosunku do próbek wzorcowych, bez bakterii. Mikropęknięcia w betonie zostały wypełnione, dzięki aktywności bakterii. Co ważne, strącanie węglanu wapnia zachodziło nie tylko na powierzchni, ale głównie wewnątrz mikrospektań, co znacznie zwiększało skuteczność metody (2).

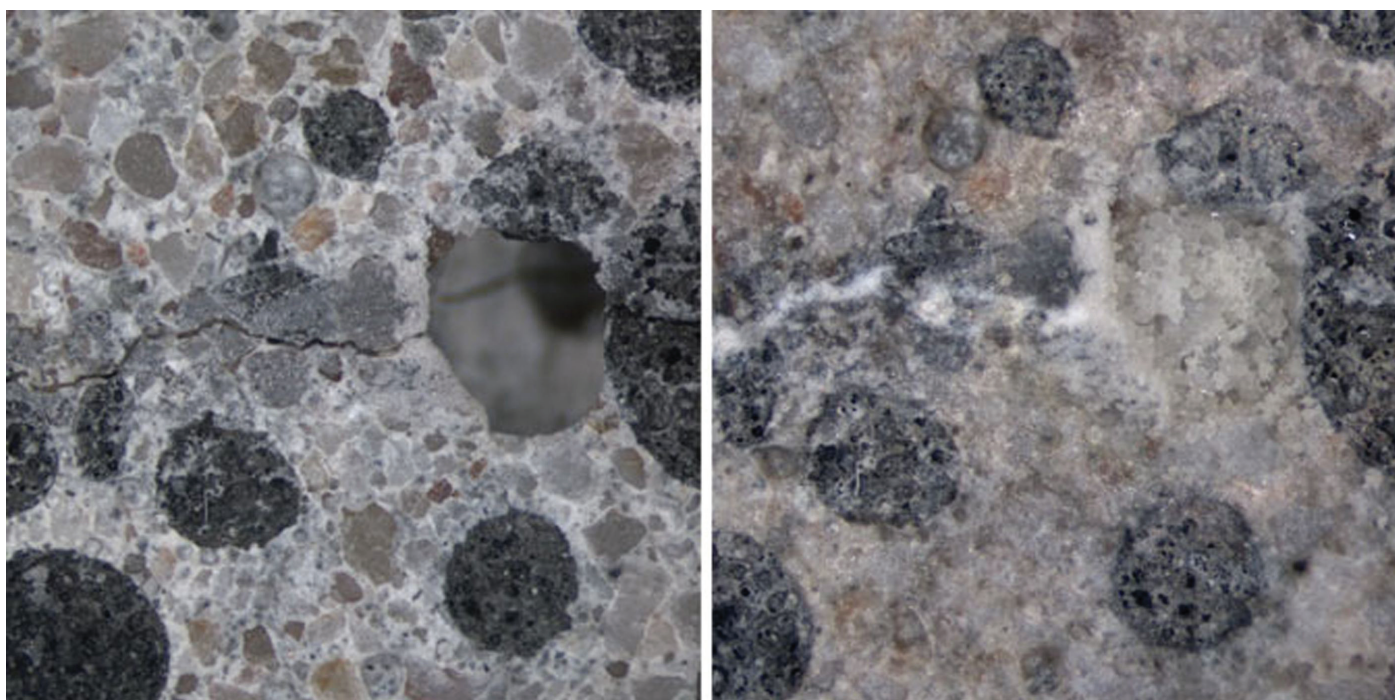
the moisture of concrete is increasing. Microcapsules are slowly dissolved and the spores can be activated. Metabolic processes of bacterial cells result in the formation of calcium carbonate and slow gluing of cracks; clear effects are already visible after 3 weeks (18).

An important issue is also to maintain the vitality of spores in concrete. In an environment spores of bacteria can survive for long periods of time without losing its properties, even up to 50 years. It should be noted, that the concrete adversely affects the vitality of spores. It has been shown that spores placed directly in concrete lose their vitality in a short time, up to two months. This phenomenon can be caused by strongly alkaline pH and hydration of cement, leading to a decrease of pores content in concrete, even below $1\ \mu\text{m}$, which is under the size of the spores (2, 9). The use of special capsules, for example from the clay particles, or melamine microcapsules, allows to prolong the vitality of spores, so that the bioconcrete will have its own self-healing property for a long time (2, 24, 25). Wang et al. (24) have elaborated a method based on a process of polycondensation leading of the spores closing in the melamine microcapsules of about $5\ \mu\text{m}$ in size [patent application No. WO 2014131913 A1]. The final effect of this method is the formation of an emulsion of microcapsules in water, with a concentration of spores of about 10^9 cells / g dry matter of microcapsules. The authors have shown also the usefulness of the obtained emulsion to remove of a concrete cracks. At the same time they were concluding, that the presence of water in the environment is a necessary factor for this process to occur (24). In order to protect the bacterial cells the silica gel can also be used (26). This gel protected bacteria from high pH, extending their vitality. At the same time, the gel containing bacteria effectively glued the microcracks by precipitation of CaCO_3 (10, 26).

The self-healing concrete, proposed by Dr. Jonkers (2), contained small – 2-4 mm foamed grains of clay minerals, which contained yeasty loamy particles. These grains contained bacterial spores i.e. 6 species of *Bacillus* in the amount of 1.7×10^5 in one g of clay grains, which was corresponding to 5×10^7 spores per $1\ \text{dm}^3$ of concrete. Additionally, approximately 5% of calcium lactate as a nutrient was added. An important step in this method was drying of the clay minerals, prior to mix them with the biological material, in order to prevent the occurrence of moisture in the environment of spores. The author (2) clearly demonstrated the effectiveness of the prepared blend in comparison to the control samples without bacteria. Microcracks in concrete have been effectively filled due to the activity of bacteria. Importantly, precipitation of CaCO_3 occurred not only on the surface of concrete but mostly inside the microcracks, which greatly increases the effectiveness of this method (2).

3. The possibilities of bioconcrete application

The bioconcrete has a chance to become increasingly popular in the construction industry. The possibility of application of this material is practically unlimited; from the construction of houses and industrial buildings, road construction: bridges tunnels and



Rys. 1. Mikropęknięcie biobetonu przed i po procesie samoleczenia (27)

Fig. 1. Microcracks of bioconcrete before and after the process of self-healing (27)

3. Możliwości stosowania biobetonu

Biobeton ma szansę stać się bardzo popularnym materiałem w budownictwie. Ten materiał budowlany może być stosowany w wielu konstrukcjach: w budynkach mieszkalnych i budowach przemysłowych, w budownictwie drogowym, dzięki zwiększeniu trwałości betonu, a także do naprawy zabytkowych budowli i pomników oraz uszkodzonych konstrukcji. Ponadto jest przyjazny dla środowiska i nie wykazuje niekorzystnego działania w stosunku do człowieka. W wielu laboratoriach badawczych prowadzono prace dotyczące porównania trwałości, wytrzymałości i innych właściwości biobetonu z normalnym betonem, a ich wyniki są bardzo obiecujące. Szczególnie interesujące są wyniki zastosowania mikroorganizmów do naprawy już istniejących budowli z betonu i kamienia, jako alternatywy dla stosowanych dotąd metod (13, 14, 28). Duże znaczenie ma również poprawa właściwości betonu, nie tylko wytrzymałości lecz przede wszystkim trwałości, przy odpowiednim dodatku bakterii do mieszanki betonowej (21).

Interesującym kierunkiem badań jest możliwość zastosowania biobetonu do oczyszczania wody. Ten materiał może być wykorzystany do budowy zbiorników na wodę, zarówno w domach, jak i zakładach przemysłowych. Beton zawierający komórki bakterii może być także stosowany do oczyszczania wody w jeziorach, stawach oraz w każdym zbiorniku wodnym, w którym jest mały przepływ i zachodzi stagnacja wody. Obejmuje to fontanny, baseny, zbiorniki do pojenia zwierząt, brzegi rzek i kanały. W badaniach laboratoryjnych zastosowanie płytek z betonu, zawierającego komórki bakterii, pozwoliło oczyścić próbki zanieczyszczonej wody już w ciągu dwóch tygodni. Po dwóch miesiącach czarna, brudna woda zmieniała swój kolor na przejrzysty, zniknął również

concrete pavements, due to the increase of durability of concrete, as well as the repairing monuments, memorials and damaged constructions and structures. Additionally, is environmentally friendly and does not show side effects for human being. In many research laboratories the works on the comparison of durability, strength and other properties of this material with conventional concrete were carried out and the results are very promising. Particularly interesting results seem to be the use of microorganisms to repair the existing buildings which have been made from concrete and stone, as an alternative to the methods used so far (13, 14, 28). Very important is also the improvement of the properties of concrete, particularly of durability in the case of the appropriate addition of micro-organisms on the concrete (21).

An interesting direction of the research is the ability of using the bioconcrete to water purification. This material can be used to build water tanks, both in houses and in industrial buildings. Concrete containing bacteria cells can be effectively used to clean the water in lakes and in any water reservoirs, where the flow is low and there is a stagnation of water; it covers also fountains, pools, reservoirs, containers for animals, the banks of rivers, canals and others. In laboratory tests, the use of concrete tiles containing bacteria cells permitted the contaminated water to be cleaned within two weeks, after two months the black water changed its color to the clear, and the odor disappeared. Bacteria of the *Bacillus* type have been used again in these experiments (13).

The use of microorganisms in the building industry can generally be divided in three techniques: the use of cement mortar with bacteria (15, 16, 29), the repair of microcracks applying to the damaged surfaces a specially prepared material containing bacteria cells (14, 15, 17, 28), or usage of bioconcrete with self-healing capability

nieprzyjemny zapach. W doświadczeniu zastosowano bakterie z rodzaju *Bacillus* (13).

Wyróżnić można trzy techniki stosowania bakterii jako środka wspomagającego samoleczenie betonu: stosowanie zaprawy cementowej z bakteriami (15, 16, 29), naprawę mikropęknięć poprzez nanoszenie na uszkodzone powierzchnie specjalnie przygotowanego materiału zawierającego komórki bakterii (14, 15, 17, 28), lub stosowanie biobetonu zdolnego do samoleczenia (18). Skuteczność wymienionych technik została potwierdzona badaniami laboratoryjnymi, część jest w trakcie stosowania w praktyce. Ta innowacyjna technologia może spowodować zmniejszenie kosztów utrzymania dróg, zwiększenie wytrzymałości konstrukcji, długotrwałe umocnienie brzegów rzek, dobrą konserwację zabytków. Ważnym zagadnieniem, jest również mniejsza szkodliwość materiałów z mikroorganizmami dla środowiska. Ponieważ w trakcie powstawania węgla wapnia zużywany jest dwutlenek węgla, więc nowa technologia zmniejsza emisję tego gazu do atmosfery. Dlatego w przeciwieństwie do tradycyjnej produkcji materiałów budowlanych, oceniana jest jako przyjazna dla środowiska. Niestety, występują obecnie ograniczenia związane z jej stosowaniem; należy wymienić przede wszystkim: duży koszt produkcji, ograniczenia związane z możliwością rozwoju bakterii w niekorzystnych warunkach środowiska, problem z długofalowym zachowaniem korzystnych właściwości biobetonu, co związane jest z żywotnością mikroorganizmów i zużywaniem pożywki. Ponadto technologia ta jest ciągle w fazie badań i wymaga jeszcze wielu lat prac naukowych, zanim zostanie opracowana najlepsza i najskuteczniejsza metoda produkcji takich materiałów, a przede wszystkim odpowiednie proporcje oraz ilości szczepów bakterii, w celu zapewnienia efektywności strącania węgla wapnia (30). Jest jeszcze kilka nierozwiązanych zagadnień ważnych z punktu widzenia praktycznego. Przede wszystkim, czas trwania wszystkich prowadzonych dotychczas badań był stosunkowo krótki. Jonkers (2) potwierdził zachowanie zdolności do samoleczenia materiału po upływie 6 miesięcy, trudno jednak bez badań oszacować, czy ta zdolność będzie zachowana przez wiele lat. Ponadto należy również wziąć pod uwagę możliwości strącania się węgla wapnia na powierzchni materiału. Powierzchnia betonu może być narażona na zawilgocenie, a to może doprowadzić do nieplanowanej aktywacji bakterii i powstawania wykwitów. Innym ważnym zagadnieniem jest bezpieczeństwo mikrobiologiczne materiału. Proponowane w badaniach bakterie nie stanowią zagrożenia dla człowieka, ale z punktu widzenia mikrobiologii rozwój jednego gatunku bakterii w pewnym miejscu może doprowadzić do powstania niszy ekologicznej, korzystnej dla rozwoju innych mikroorganizmów. Dlatego też, należy zbadać zachowanie takich materiałów w dłuższym okresie.

4. Podsumowanie

Stosowanie biobetonu jako materiału budowlanego jest bardzo prawdopodobne w świetle związanych z tym korzyści. Dzięki zdolności do samoleczenia biobeton może okazać się trwalszy,

(18). The effectiveness of all three techniques has been confirmed in laboratory research, some part are tested in industrial application. This innovative technology can lead to the lowering of roads maintenance costs, increased durability of buildings, effective and long-lasting shoreline consolidation, effective protection of monuments and others. An important issue is also the lower harmfulness of materials with microorganisms for the environment. Because, during the production of CaCO_3 the carbon dioxide is consumed, this technology has a positive effect on this gas emissions to the atmosphere. Therefore, in contrast to the traditional production of building materials, it is judged to be environmentally friendly. Unfortunately, at the present there are limitations of its use, such as: high cost of production, the possibility of bacterial growth in adverse environmental conditions, the problem with the long-term behavior of bioconcrete properties i.e. microbial life, exhaustion of medium. In addition, this technology is still in the exploration phase and requires many years of testing before it will be possible to develop the best and most efficient method for these materials production, taking into account particularly an appropriate proportions and concentration of bacterial strains and CaCO_3 precipitation efficiency (30). There are still a few issues that need to be considered before releasing material for general circulation. First and foremost, all tests concerning the effectiveness of this material has been done so far in relatively short periods of time. Dr. Jonkers has confirmed the self-healing behavior of bioconcrete after 6 months, but it is difficult to estimate now how these abilities will look over the years. Moreover, the possibility of precipitation of calcium carbonate on the surface of the material should also be taken into account. The surface of the concrete will be exposed to moisture during exploitation, which can lead to unplanned bacterial activation and theoretically producing unexpected efflorescence. Another important issue is the microbiological safety of the material. The bacteria proposed in the study do not pose a threat to human being, but from a microbiological point of view, the development of one species of bacteria at a specific place can lead to the creation of ecological niche that is beneficial to the development of other microorganisms. Therefore, a safety assessment of such material should also be carried out over the years.

4. Summary

The implementation of bioconcrete as a building material seems to be very probable, the benefits of its use are obvious and not subject to discussion. This material, due to its self-healing properties, will be much more durable, and the structures in which it will be used - more resistant to corrosion and damage, in comparison to the common concrete. Further laboratory and industrial research should focus on creating a process of effective and complete control of microbial colonies used for self-healing of bioconcrete, while maintaining microbiological safety and minimizing side effects. The aim is to develop not only a good bioconcrete, but also the best technology of its production. It is definitely possible to conclude that bioconcrete is one of the materials of the future and can solve many of the existing problems in the building industry.

a konstrukcje, w których zostanie zastosowany, mniej podatne na korozję i uszkodzenia w porównaniu z konstrukcjami z betonu zwykłego. Dalsze badania laboratoryjne i próby przemysłowe powinny dotyczyć opracowania dobrej metody hodowli oraz pełnej kontroli kolonii mikroorganizmów wykorzystywanych do samoleczenia biobetonu, z jednoczesnym utrzymaniem bezpieczeństwa mikrobiologicznego oraz minimalizacją efektów ubocznych.

Literatura / References

1. M. Pelletier, R. Brown, A. Shukla, A. Dostępny on-line (2017-08-21): <http://energetics.chm.uri.edu/system/files/Self+healing+concrete+-7-11.pdf>
2. H. Jonkers. *Heron*, **56**, 1 (2011).
3. S. Wei, Z. Jiang, H. Liu, D. Zhou, M. Sanchez-Silva. *Brazilian Journal of Microbiology*, **44**, 4, 1001 (2013).
4. V. Harbuláková, A. Estokova, N. Stevulova. *Pollack Periodica*, **5**, 1, 87 (2010).
5. J. Zapala. *Structure and Environment*, **2**, 2, 14 (2010).
6. A. Neville. *Concrete International*, **24**, 11, 76 (2002).
7. H. Reinhardt, M. Jooss. *Cem. Concr. Res.*, **33**, 981 (2003).
8. E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L. Ozawa Meida. *Annual review of energy and the environment*, **26**, 1, 303 (2001).
9. H. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen, *Ecological Engineering*, **36**, 2, 230 (2010).
10. J. Wang, K. Tittelboom, N. DeBelie, W. Verstraete, *Constr. Build. Mat.*, **26**, 532–540 (2012).
11. M. Seshagiri Rao, V. Srinivasa Reddy, M. Hafsa, P. Veena, P. Anusha. *Research Journal of Engineering Sciences*, **2**, 6, 45 (2013).
12. W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete. *Ecological Engineering*, **36**, 118 (2010).
13. B. Kumari. *Inter. J. of Advances in Engineering & Technology*, **7**, 6, 1608 (2015).
14. W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, W. Verstraete. *Cem. Concr. Res.*, **38**, 1005 (2008).
15. S. Ramachandran, V. Ramakrishnan, S. Bang. *ACI Materials Journal*, **98**, 1, 3, (2001).
16. V. Achal, A. Mukherjee, M. Reddy. *J. of Industrial Microbiology & Biotechnology*, **38**, 7, 1229 (2011).
17. S. Bang, J. Galinat, V. Ramakrishnan. *Enzyme and Microbial Technology*, **28**, 404 (2001).
18. H. Jonkers, E. Schlangen. *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*. Springer, The Netherlands 2007.
19. S. Abo-El-Enein, A. Ali, F. Talkhan, H. Abdel-Gawwad. *HBRC Journal*, **9**, 36 (2013).
20. V. Achal, A. Mukherjee, M. Reddy. *J. of Materials in Civil Engineering*, **23**, 6, 730 (2010).
21. J. Harshali, S. Mitali, A. Neha, B. Pragati. *IJRET*, **5**, 5, 95 (2016).
22. V. Achal, X. Pan, N. Özyurt. *Ecological Engineering*, **37**, 4, 554 (2011).
23. S. Bang, J. Lipperta, U. Yerrab, S. Mulukutlab, V. Ramakrishnan. *International Journal of Smart and Nano Materials*, **1**, 1, 28 (2010).
24. J. Wang, H. Soens, W. Verstraete, N. De Belie. *Cem. Concr. Res.*, **56**, 139 (2014).
25. V. Wiktor, H. Jonkers. *Cem. Concr. Comp.*, **33**, 7, 763 (2011).
26. K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, W. Verstraete. *Cem. Concr. Res.*, **40**, 1, 157 (2010).
27. <http://syndebio.com/bio-concrete/> (dostępny 2017-08-21).
28. W. De Muynck, K. Cox, N. De Belie, W. Verstraete. *Constr. Build. Mat.*, **22**, 5, 875 (2008).
29. C. Qian, H. Chen, L. Ren, M. Luo. *Frontiers in Microbiology*, **6**, 1225 (2015).
30. M. Vekariya, J. Pitroda. *IJETT*, **4**, 9, 4128 (2013).