

DETERIORACJA NATURALNYCH KAMIENI BUDOWLANYCH PRZEZ MIKROORGANIZMY

Elżbieta WOŁEJKO*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45, 15-351 Białystok

Streszczenie: Prezentowana praca jest artykułem przeglądowym na temat roli mikroorganizmów, takich jak: bakterie, glony, sinice i grzyby, biorących aktywny udział w biodeterioracji naturalnych kamieni. Materiały te są narażone na działanie czynników atmosferycznych powodujących zarówno fizyczne, jak i chemiczne wietrzenie skał, przyspieszających biologiczne niszczenie kamieni przez naruszenie ich macierzy skalnej, czyniąc je bardziej wrażliwymi na atak mikrobiologiczny. Zasiedlanie kamieni naturalnych przez mikroorganizmy z utworzeniem błony biologicznej rozpoczyna się przez gatunki pionierskie, które z biegiem czasu wymieniają się na bardziej złożone zespoły. Mikroorganizmy bytujące na kamieniach znajdują w nich wiele elementów niezbędnych do ich metabolizmu, powodując istotne zmiany na powierzchniach budynków i pomników wykonanych z naturalnych kamieni, włączając wielokolorowe plamy i osady tworzące skorupy.

Słowa kluczowe: korozja biologiczna, mikroorganizmy, bakterie, porosty, sinice, grzyby, kamień.

1. Wprowadzenie

W budownictwie przyjęło się określenie „korozja biologiczna” (biokorozja) obejmujące zjawiska biodegradacji materiałów wywołanych czynnikami biologicznymi (Rymsza, 2005). Problemem korozji biologicznej dotkniętych jest wiele materiałów budowlanych, takich jak: drewno, wyroby papierowe, tworzywa sztuczne, materiały nieorganiczne (cegła, zaprawa, kamień, szkło), farby i lakiery (Pastuszka i in., 2000). W literaturze możemy spotkać się również z pojęciem „biodeterioracja”, co oznacza ogólne obniżenie jakości materiałów budowlanych spowodowane niekorzystnym oddziaływaniem czynników biologicznych, a szczególnie działalnością mikroorganizmów. W środowisku naturalnym procesy biodeterioracji są szeroko rozpowszechnione, a aktywność metaboliczna różnorodnych mikroorganizmów wpływa na indukowanie bezpośredniej lub pośredniej biodeterioracji materiałów mineralnych (Cwalina, 2003).

Kamienie naturalne są narażone na działanie czynników atmosferycznych powodujące zarówno fizyczne jak i chemiczne wietrzenie skał (wiatr, światło słoneczne, temperatura, deszcz, śnieg i wilgoć), co w konsekwencji przyspiesza biologiczne niszczenie kamieni. Dzieje się tak na skutek naruszenia macierzy skalnej czyniąc ją bardziej wrażliwą na atak

mikrobiologiczny (Brimblecombe i Grossi, 2010). Na rozwój określonych mikroorganizmów wpływają również charakter i właściwości powierzchni (zawartość procentowa różnych minerałów, pH, zasolenie, zawartość wilgoci czy też występowanie odchodów zwierzęcych) (Nuhoglu i in., 2006).

Biodeterioracja kamiennych budowli i pomników może być klasyfikowana w kategoriach biofizycznych, biochemicznych i estetycznych. Procesy te w zależności od charakteru kamieni i biodeteriogenów, a także warunków środowiskowych mogą występować oddzielnie lub jednocześnie. Jak podaje Warscheid i Braams (2000) biofizyczna deterioracja kamienia może następować wskutek ciśnienia wywieranego na otaczające powierzchnie przez rozwijające się mikroorganizmy i ich metabolity, które penetrują w głąb materiału przez już istniejące pęknięcia lub szczeliny, powodując naprężenia, a tym samym uszkodzenia. W wyniku bytowania mikroorganizmów wytwarzają się błony biologiczne wpływające na zmianę porowatości z wytworzeniem mikropęknięć związanych ze zmianami dyfuzji pary wewnątrz materiału. Zjawiska te są powodowane przez zewnątrzkomórkowe substancje polimeryczne (ang. *extracellular polymeric substances*; EPS) i związki zmniejszające napięcie powierzchniowe, wydzielane do środowiska przez mikroorganizmy (Grossi i Brimblecombe, 2008). Kamień uszkodzony w trakcie

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: e.wolejko@pb.edu.pl

procesów biofizycznych jest bardziej wrażliwy na działanie innych czynników niszczących, a w szczególności biochemicznych, do których przyczynia się działalność mikroorganizmów produkujących korozyjne metabolity reagujące ze składnikami minerału (Żakowska, 2006).

Ze względu na powszechność wykorzystywania naturalnych kamieni jako materiałów budowlanych, celem przedstawionej pracy jest omówienie roli mikroorganizmów biorących aktywny udział w biodeterioracji tych materiałów.

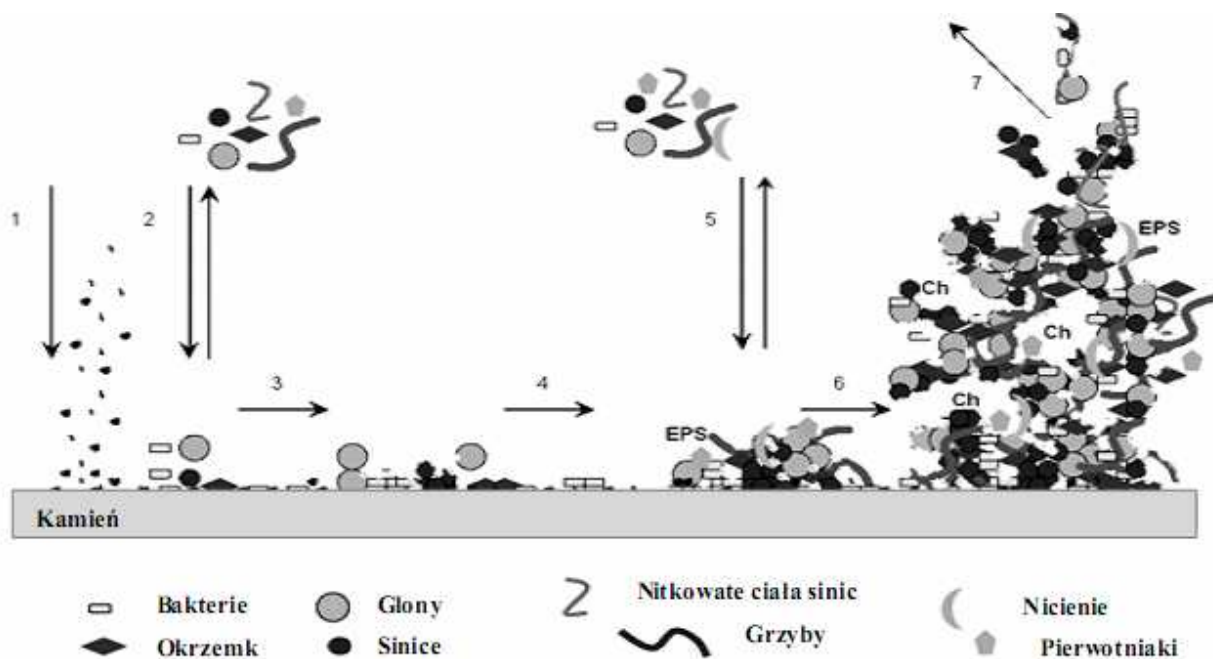
2. Rola mikroorganizmów w tworzeniu biofilmów

Zasiedlanie kamieni naturalnych z wytworzeniem błony biologicznej rozpoczyna się przez gatunki pionierskie, które z biegiem czasu wymieniają się na bardziej złożone zespoły. Mikroorganizmy bytujące na kamieniach znajdują wiele pierwiastków biogennych niezbędnych do ich metabolizmu, takich jak: wapń, glin, krzem, żelazo czy potas (Nuhoglu i in., 2006), przyczyniając się do tworzenia biofilmu. Z danych literaturowych wynika, że w rozwój biofilmu mogą być zaangażowane pojedyncze gatunki drobnoustrojów, jednak najczęściej w skład hydrożelu wchodzi różny pod względem taksonomicznym mikroorganizmy, wśród których wyróżnia się: bakterie, promieniowce, drożdże oraz grzyby strzępkowe, jak również komponenty organiczne, pochodzące z żywych komórek oraz ich produkty degradacji (Kołwzan, 2011).

Architektura biofilmu uzależniona jest od wielu czynników biologicznych i fizykochemicznych takich jak:

warunki hydrodynamiczne, zawartość substancji odżywczych, ruchliwość bakterii, komunikacja międzykomórkowa oraz zawartość egzopolisacharydów czy białek. Na dojrzałość postaci biofilmu składa się wiele mikrokolonii tworzących specyficzne zgrupowania. Możemy wyróżnić trzy podstawowe typy budowy błon biologicznych tworzących biofilm – płaski (dwuwymiarowy), kolumnowy oraz tak zwany model grzyba. W środowisku o dużej sile ścinającej (strumień wody) biofilm przybiera postać rozciągniętych pasków, ułożonych w cienkiej warstwie wzdłuż powierzchni przylegania, natomiast w środowisku o wolnym przepływie wody biofilm tworzy masę w postaci „grzyba” (Flemming i Wingender, 2010).

Jak podają Monds i O'Tool (2009) kolonizacja różnych powierzchni kamieni przez mikroorganizmy możliwa jest dzięki ich adhezyjnym właściwościom, natomiast strukturę powstałego biofilmu stabilizują substancje polimeryczne wydzielane pozakomórkowo (EPS) tworzące tak zwane glikokaliks. Na początku podłoże pokrywa pojedyncza warstwa komórek drobnoustrojów, po czym następuje synteza i wzmożone wydzielanie biopolimerów zewnątrzkomórkowych. Powstające skupisko otoczone śluzem stymuluje adhezję innych mikroorganizmów (Baranowska i Rodziejewicz, 2008). Dojrzewanie biofilmu poprzez namnażanie drobnoustrojów z wytwarzaniem mikrokolonii umożliwia adhezję nieodwracalną. W komórkach drobnoustrojów dochodzi do aktywacji lub hamowania ekspresji niektórych genów, które prowadzą do dojrzewania biofilmu i wystąpienia odpowiednich cech fenotypowych, uzależnionych od warunków i potrzeb tworzącej się społeczności komórek (rys. 1).

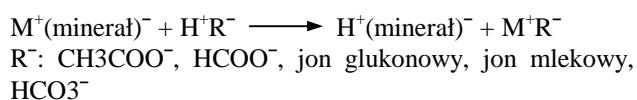


Rys. 1. Rozwój biofilmu (Nikolaev i Plakunov, 2007): (1) – początek zasiedlania powierzchni; (2) – wstępna odwracalna adhezja na powierzchniach stałych (bakterie, glony, sinice i okrzemki); (3) – przejście do nieodwracalnej adhezji, mnożenia, początek EPS; (4) – początek trójwymiarowego rozwoju struktury biofilmu; (5) – nieodwracalna adhezja i ciągły rozwój biofilmu; (6) – dojrzewanie biofilmu; (7) – faza homeostazy utrzymująca w równowadze wzrost struktury biofilmu i oddzielenie się komórek, które kolonizują nowe powierzchnie

Jak zauważył Bryers (2008) bakterie bytujące wewnątrz biofilmu narażone są na brak tlenu. Z tego względu zmienia się ich metabolizm, wzrasta aktywność beztlenowych szlaków metabolicznych, takich jak: desulfurikacja, denitryfikacja i fermentacja oraz zahamowaniu ulega też synteza niektórych enzymów (na przykład proteaz, fosfolipazy C). W ostatnim etapie rozwoju biofilm osiąga tak zwaną krytyczną grubość i stopniowo przestaje utrzymywać istniejącą formę. Następuje wówczas migracja komórek z peryferyjnych części dojrzałego biofilmu do otoczenia (Liu i Tay, 2001). Kołwzan (2011) uważa, że przyczyną tego zjawiska może być wyczerpanie składników pokarmowych lub problemy z ich przepływem w obrębie błony. W ten sposób biofilm przystosowuje się do zmian środowiskowych, a oderwane komórki rozpoczynają proces kolonizacji nowych powierzchni (rys. 1), przyczyniając się tym samym do rozpadu piaskowców, granitu, wapieni, dolomitu, a nawet bazaltu.

2.1. Biodeterioracja naturalnych kamieni przez bakterie

Bakterie należą do bardzo aktywnej metabolicznie grupy mikroorganizmów, które uszkadzają naturalne kamienie i ze względu na wymagania środowiskowe, określa się je jako grupę chemolitotroficzną. W wyniku aktywności mikroorganizmów chemolitotroficznych tworzących kwas azotowy lub siarkowy dochodzi do korozji kwasowej kamienia, którą można przedstawić za pomocą poniższego schematu (Perego i Fabiano, 1999):



Organizmy autotroficzne wykorzystują CO₂ z atmosfery jako źródło węgla i produkują korozyjne kwasy organiczne. Kwas siarkowy wydzielany podczas bytowania przez na przykład *Acidithiobacillus sp.*, reaguje z węglanem wapnia tworząc uwodniony siarczan wapnia, czyli gips (Cwalina, 2003). Aktywność metaboliczna bakterii *Nitrosomonas sp.* i *Nitrobacter sp.*, wydzielających kwas azotowy (V) oraz kwas azotowy (III) do środowiska, przyczynia się do rozwarstwiania i sproszkowania niektórych rodzajów kamienia (Crispim i Gaylarde, 2004).

Organizmy heterotroficzne zasiedlające kamienie uczestniczą w ich deterioracji dzięki mechanizmom włączającym uwalnianie biogenne kwasy, mogące chelatować niektóre jony metali, natomiast roztrawianie kamieni jest związane z kompleksowaniem kationów, do których zaliczamy głównie: Ca²⁺, Mn²⁺, Fe³⁺, Al³⁺ oraz Si⁴⁺ (Kumar i Kumar, 1999). Wydzielane kwasy organiczne i nieorganiczne rozkładają poszczególne komponenty kamienia w wyniku tworzenia się soli i chelatów. Ponadto, zwiększona objętość rozpuszczalnych soli i chelatów może powodować naprężenia w porach, co skutkuje tworzeniem się szczelin, podczas gdy nierozpuszczalne sole i chelaty mogą się gromadzić na powierzchni kamienia jako skorupy

(Warscheid i Braams, 2000) w postaci plam, zacieków, wykwitów, puszystych nalotów i szklanych powłok (rys. 2).



Rys. 2. Korozja solna muru wykonanego z kamienia wapiennego (Ważny i Karyś, 2001)

Niektóre bakterie heterotroficzne odpowiedzialne są również za wizualne zmiany powierzchni kamieni, włączając w to bezpośrednią pigmentację wierzchniej warstwy kryształów skały, pojawiają się w postaci kolorowych biologicznych patyn (Krumbein, 2002). Warto podkreślić, że mikroorganizmy kolonizujące powierzchnię kamieni na początku mogą nie powodować żadnych dostrzegalnych zmian w składzie chemicznym minerałów tworzących kamień, ale z czasem powodują nieodwracalne fizykochemiczne uszkodzenia w materiale (Kumar i Kumar, 1999; Valentini i in., 2012).

2.2. Biodeterioracja naturalnych kamieni przez glony i sinice

Na wilgotnych i ciepłych powierzchniach, w miejscach do których dociera światło, rozwijają się epifityczne glony należące do zielenic i sinic z rodzaju *Pleurococcus*, *Stichococcus*, *Trentepohlia*, *Oscillatoria* i *Scytonema*. Ich wpływ na uszkodzenia powierzchni budynków związany jest z zatrzymywaniem wody przez biomasę glonów. Zmiany temperatury, powtarzające się cykle zamrażania i rozmrażania wody zwiększają okresowo jej objętość i powodują mechaniczne uszkodzenia fasad i elewacji (Morton i Surman, 1994).

Sinice należą do organizmów, które powodują nieestetyczne uszkodzenia kamiennych budowli oraz pomników, tworząc różnorodnie zabarwione błony biologiczne na ich powierzchniach (Favali i in., 2000). Roztrawianie kamienia spowodowane na przykład bytowaniem bakterii przyczynia się do zasiedlania przez sinice mikroskopijnych zagłębień, takich jak granice faz kryształów w kamieniu. Poprzez bytowanie sinic następuje zmniejszenie spójności kryształu i rozwój korozji wżerowej (Danin i Caneva, 1990).

Śluz wydzielany przez sinice na kamieniach jest cyklicznie wysuszany i zwilżany, co prowadzi do wielokrotnego naprężania się i rozluźniania błon biologicznych, w wyniku czego następuje biofizyczna

deterioracja kamienia. Biofilmy tworzone przez sinice podtrzymują wzrost heterotroficznych organizmów, takich jak grzyby lub bakterie posiadające znaczny potencjał destrukcyjny, stanowiąc dla nich doskonałe źródło pożywienia (Robins i in., 1986). Ponadto, biofilm sinic zawiera zwykle znaczne ilości zaadsorbowanych związków nieorganicznych pochodzących z kamienia i powietrza. Ułatwia on przywieranie cząsteczek stałych z zanieczyszczonego powietrza, powodując powstawanie trudno usuwalnych twardych skorup i patyn (Kumar i Kumar, 1999).

Głony, dzięki zawartemu w nich chlorofilowi należą do organizmów fotosyntezujących. Deterioracja kamieni budowlanych nie jest spowodowana przez same glony, tylko przez wzajemną współpracę glonów z bakteriami i grzybami. Jak podaje Cwalina (2003), glony uważane są za czynnik powodujący utratę wartości estetycznych kamiennych budowli i pomników poprzez tworzenie patyn na ich powierzchni, różniących się rozmiarami, grubością, konsystencją i kolorem. Ze względu na to, że do rozwoju potrzebują one wody, najczęściej możemy spotkać glony w miejscu o podwyższonej wilgotności. Zazwyczaj porastają one pas przyziemia budynku oraz miejsca, gdzie występuje podwyższona wilgotność.

W środowiskach nasłonecznionych i względnie suchych, patyny są cienkie, twarde, bardzo często szare lub czarne, a czasami zielone. W miejscach wilgotnych i słabo oświetlonych są one grube, galaretowate i różnej barwy (zielone, żółte, pomarańczowe, fioletowe i czerwone).

2.3. Biodeterioracja naturalnych kamieni przez porosty

Porosty stanowią wyjątkową grupę organizmów obecnych na każdym kontynencie. Powstały w wyniku symbiotycznego połączenia organizmów: heterotroficznego – grzyba i autotroficznego – glonu. Owa dualistyczna natura porostów, jak podają Matwiejuk i Korobkiewicz (2012) wyraża się licznymi cechami. Jedną z nich jest duża wrażliwość na zmiany warunków siedliskowych wywołana przez czynniki naturalne i antropogeniczne. Porosty należą do organizmów odznaczających się dużą odpornością na czynniki atmosferyczne (skrajne temperatury, brak wody i krótki okres wegetacyjny), ale jednocześnie wykazują wysoką czułość na zanieczyszczenie powietrza (głównie przez SO_2 i NO_x), zanieczyszczenie wód, gospodarkę leśną, zmiany stosunków wodnych, urbanizację i ruch turystyczny.

Istotną rolę w biodeterioracji kamienia odgrywa penetracja plechy porostów do porów już istniejących pęknięć i szczelin w kamieniach, takich jak: granity, piaskowce, marmury oraz głązy wapienne wykorzystywane od dawien dawna przez człowieka do budowy pomników, murów, nagrobków, czy też obelisków. Aktywność metaboliczna porostów prowadzi także do korozji chemicznej minerałów z powodu produkcji biogenych kwasów organicznych i innych czynników chelatujących. Z danych literaturowych wynika, że dla agresywnych metabolicznie

porostów nie stanowią większej bariery nawet barwniki farb wykonanych na bazie tlenków takich metali jak: ołów, rtęć czy mangan. Stwierdzono również, że niektóre porosty są odpowiedzialne za tworzenie czerwono-brunatnej patyny pokrywającej budowlę wykonane z wapienia, jak również z marmuru (rys. 3). Do najczęstszych gatunków porostów bytujących na podłożu skalnym należą: *Lacanora dispersa*, *Lacanora albescens*, *Caloplaca decipiens*, *Caloplaca citrina*, *Caloplaca saxicola*, *Candelariella aurella*, *Neofuscelia loxodes*, *Protoparmeliopsis murali* oraz *Xanthoria parietina* (Matwiejuk, 2007).



Rys. 3. Wżery spowodowane przez atak porostów na monumencie wykonanym z dolomitu (Becker i in., 1994)

2.4. Biodeterioracja pleśniowa naturalnych kamieni

Biodeterioracja pleśniowa jest to specyficzny rodzaj korozji występującej w obiektach budowlanych, która może wywoływać pogorszenie właściwości użytkowych w wyniku sumowania się dwóch niekorzystnych procesów: mikotoksycznego skażenia środowiska oraz biodegradacji materiałów budowlanych (Papciak i Zamorska, 2007).

Organizmy heterotroficzne, do których zaliczamy grzyby zasiedlające różnorodne środowiska, odgrywają wiodące znaczenie w procesie rozkładu materii organicznej i globalnym obiegu pierwiastków. Dobrze rozwijają się tam, gdzie mają dostateczną ilość substancji odżywczych, optymalną wilgotność (70%), odpowiednią temperaturę (16-28°C do 40°C) i odczyn środowiska o pH 5,6-6,5. Charakteryzują się zróżnicowaną organizacją struktury, począwszy od jednokomórkowców, aż po organizmy o złożonej, skomplikowanej budowie plech (Wołajko i Matejczyk, 2011).

Liczba oraz zróżnicowanie rodzajów grzybów występujących w powietrzu atmosferycznym zależy od wielu czynników, takich jak: klimat, stopień zurbanizowania, charakter fauny i flory, ale również od godziny występowania opadów w ciągu dnia lub nocy (Kleinheinz i in., 2006). Pozostałości organiczne obecne na kamieniach stymulują wzrost wielu grzybów, które przyczyniają się do degradacji kamienia dzięki biofizycznym i biochemicznym mechanizmom (Griffin

i in., 1991). Do najczęściej występujących grzybów należą: *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Fusarium sp.*, *Candida sp.*, *Alternaria sp.* oraz *Cladosporium sp.* (Guiamet i in., 2012).

Grzyby rozkładając materiały organiczne, które stanowią dla nich bogate źródło substancji odżywczych, wydzielają do otoczenia wiele produktów przemiany materii, takich jak: woda, kwasy organiczne (mlekowy, octowy, cytrynowy, jabłkowy i bursztynowy), wchodzących łatwo w reakcję z solami wapnia, żelaza i potasu, tworząc związki, takie jak mleczany czy octany. Produkty te mają destrukcyjne działanie na cegłę i kamień, powodując ich przebarwienia, wykwyty soli mineralnych, odpryskiwanie i kruszenie (Papciak i Zamorska, 2007).

3. Podsumowanie

W specjalistycznych opracowaniach naukowych możemy znaleźć wiele opisów zagadnień związanych z mikrobiologicznym niszczeniem różnych materiałów budowlanych. Przyczyniają się one do zwiększenia świadomości społeczeństwa, a tym samym skutkują większą dostępnością w handlu środków chemicznych działających antybiodegradacyjnie.

Materiał kamienny, z którego wykonuje się pomniki, mury, nagrobki i obeliski, czy też wykorzystywany w budownictwie jest uważany za praktycznie niezniszczalny. Jednak wzmożona aktywność mikrobiologiczna niewątpliwie istotnie wpływa na rozwój zmian mineralnych, w konsekwencji powodując rozpad skalnych materiałów budowlanych i monumentów. Warto podkreślić, że zanim pojawią się zauważalne zmiany zewnętrzne, które można usunąć za pomocą piaskowania, mycia wodą pod ciśnieniem, czy też za pomocą biocydów, rozkład skał naturalnych może być już tak daleko zaawansowany, że wykonanie zabiegu będzie wystarczające jedynie na krótki czas, przerywając agresję mikroorganizmów zaledwie na kilka miesięcy.

Literatura

- Baranowska K., Rodziejewicz A. (2008). Molekularne interakcje w biofilmach bakteryjnych. *Kosmos*, Vol. 57, No. 1-2, 29-38.
- Becker T. W., Krumbein, W. E., Warscheid Th., Resende M. A. (1994). Investigations into Microbiology. W: IDEAS Investigations into devices against Environmental Attack on Stones Final Report. Bianchi, H.K. (Ed.). *GKSS-Forschungszentrum*, Geesthacht.
- Brimblecombe P., Grossi C. M. (2010). Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution. *The Scientific World Journal*, Vol. 10, 116-125.
- Bryers J. D. (2008). Medical biofilms. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 100, No. 1, 1-18.
- Crispim C. A., Gaylarde C. C. (2004). Cyanobacteria and biodeterioration of cultural heritage: A Review. *Microbial Ecology*, Vol. 49, No. 1, 1-9.
- Cwalina B. (2003). Rola mikroorganizmów w deterioracji naturalnych kamieni budowlanych. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, Vol. 1, 39-48.
- Danin A., Caneva G. (1990). Deterioration of limestone walls in Jerusalem and marble monuments in Rome caused by Cyanobacteria and cyanophilous lichens. *International Biodeterioration*, Vol. 26, No. 6, 397-417.
- Favali M. A., Fossati F., Realini M. (2000). Biodeterioration of natural and artificial stones caused by lichens and algae. W: *Microbial Corrosion*. European Federation of Corrosion. Sequeira C.A.C. (Ed.). *IOM Communications*, London.
- Fleming H. C., Wingender J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, Vol. 8, No. 9, 623-633.
- Griffin P. S., Indictor N., Koestler R. J. (1991). The biodeterioration of stone: A Review of deterioration mechanisms, conservation case histories and treatment. *International Biodeterioration*, Vol. 28, No. 1-4, 187-207.
- Grossi C. M., Brimblecombe P. (2008). Past and future colouring patterns of historic stone buildings. *Revista Materiales de Construcción*, Vol. 58, 143-160.
- Guiamet P. S., Rosato V., Gómez de Saravia S., García A. M., Moreno D. A. (2012). Biofouling of crypts of historical and architectural interest at La Plata Cemetery (Argentina). *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 13, No. 3, 339-344.
- Kleinheinz G. T., Langolf B. M., Englebert E. (2006). Characterization of airborne fungal levels after mold remediation. *Microbiological Research*, Vol. 161, No. 4, 367-376.
- Koźwzan B. (2011). Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania. *Ochrona Środowiska*, Vol. 33, No. 4, 3-14.
- Krumbein W. E. (2002). Patina and cultural heritage – a geomicrobiologist's perspective. W: *5th EC Conference „Cultural Heritage Research: a Pan-European Challenge”*, Kraków.
- Kumar R., Kumar A. V. 1999. Biodeterioration of stone in tropical environments: an overview. *Getty Conservation Institute*, Los Angeles.
- Liu Y., Tay J. H. (2001). Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behavior of biofilms. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol. 17, No. 2, 111-117.
- Matwiejuk A. (2007). Porosty Białegostoku. Analiza florystyczno-ekologiczna. *Ekonomia i Środowisko*, Białystok.
- Matwiejuk A., Korobkiewicz K. (2012). Porosty jako wskaźniki stanu zanieczyszczenia powietrza na terenie Narwi (Podlasie, Północno-Wschodnia Polska). *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, Vol. 52, 113-122.
- Monds R. D., O'Tool G. A. (2009). The developmental model of microbial biofilms: Ten years of a paradigm up for review. *Trends in Microbiology*, Vol. 17, No. 2, 73-87.
- Morton L. H. G., Surman S. B. (1994). Biofilms in biodeterioration – A Review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 34, No. 3-4, 203-221.
- Nikolaev Y. A., Plakunov V. K. (2007). Biofilm – „City of microbes” or an analogue of multicellular organisms? *Microbiology*, Vol. 76, No. 2, 125-138.
- Nuhoglu Y., Oguz E., Uslu H., Ozbek A., Ipekoglu B., Ocak I., Hasenekoglu I. (2006). The accelerating effects of the microorganisms on biodeterioration of stone monuments under air pollution and continental-cold climatic conditions in Erzurum, Turkey. *Science of the Total Environment*, Vol. 364, No. 1-3, 272-283.
- Papciak D., Zamorska J. (2007). Korozja mikrobiologiczna w budynkach powodowana przez grzyby. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Vol. 46, 87-98.

- Pastuszka J. S., Kyaw T., Paw U., Lis D. O., Wlazło A., Ulfing K., (2000). Bacterial and fungal aerosol in indoor environmental in Upper Silesia. Poland. *Atmospheric Environmental*, Vol. 34, No. 22, 3833-3842.
- Perego P., Fabiano B. (1999). Corrosion microbial. W: Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation. Flickinger M. C., Drew S. W. (Ed.). *John Wiley Sons, Inc.*, New York.
- Robins R. J., Hall D. O., Shi D. J., Turner R.J., Rhodes M. J. C. (1986). Mucilage acts to adhere Cyanobacteria and cultured plant cells to biological and inert surfaces. *Microbiology Letters*, Vol. 34, No. 2, 155-160.
- Rymsza B. (2005). Biodeterioracja pleśniowa – nieszczęście, którego można uniknąć. *Alergia*, Vol. 1, No. 23, 39-43.
- Valentini F., Diamantia A., Carbone M., Bauer E. M., Palleschi G. (2012). New cleaning strategies based on carbon nanomaterials applied to the deteriorated marble surfaces: A comparative study with enzyme based treatments. *Applied Surface Science*, Vol. 258, No. 16, 5965-5980.
- Warscheid Th., Braams J. (2000). Biodeterioration of stone: A Review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, Vol. 46, No. 4, 343-368.
- Ważny J., Karyś J. (2001). Ochrona budynków przed korozją biologiczną. *Arkady*, Warszawa.
- Wołejko E., Matejczyk M. (2011). Problem korozji biologicznej w budownictwie. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, Vol. 2, No. 2, 191-195.

Żakowska Z. (2006). Mikroorganizmy w procesie biodeterioracji i biodegradacji materiałów technicznych. W: *Materiał IV Międzynarodowej Konferencji Naukowej. nt. Rozkład i korozja mikrobiologiczna materiałów technicznych*, Łódź, 12-15.

DETERIORATION OF NATURAL BUILDING STONES BY MICROORGANISMS

Abstract: The article reviews the literature on the role of microorganisms taking an active part in the biodeterioration of natural stones. From the beginning natural stones are subject to weather conditions that cause both physical and chemical weathering of rocks accelerate biological destruction of stones the stability of the rock matrix making them more susceptible to microbial attack. Colonization of natural stones by microorganisms with the formation of a biofilm is initiated by pioneer species that to exchange they are with more complex assemblies with time. Microorganisms living on stones find many elements necessary for their metabolism, causing significant changes on the surfaces of buildings and monuments made of natural stone, including multicolored stains and deposits forming a crust.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach pracy statutowej nr S/WBiIŚ/3/2011.