



GEOMECHANICZNA OCENA WŁAŚCIWOŚCI BUDOWLANYCH OPOK REJONU KAZIMIERZA DOLNEGO I ICH ZNACZENIE HISTORYCZNE

JOANNA PINIŃSKA, *joanna.pininska@uw.edu.pl*

ALICJA BOBROWSKA

DOMINIK ŁUKASIAK

Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski

Streszczenie: Na terenie środkowo-wschodniej Polski w osadach górnej kredy występują unikalne osady węglanowe – opoki, wykorzystywane od wielu wieków jako surowiec budowlany zwany „białym kamieniem”. Wzniesione z nich obiekty sakralne, zamki obronne, spichlerze zbożowe oraz mieszczańskie kamienice są unikalnymi śladami średniowiecznego budownictwa regionalnego. Wiele z tych obiektów uległo katastroficznym destrukcji. Podstawą zapewnienia kamiennej konstrukcji długotrwałej stateczności jest bowiem odpowiednie dostosowanie metod protekcji do indywidualnych cech geotechnicznych danej skały oraz do lokalnych warunków geosrodowiskowych. Nie zawsze jest to przestrzegane. Problematykę tą przedstawiono na przykładzie kamiennej architektury znanego zespołu turystycznego jakim jest miasto Kazimierz Dolny. Przy zastosowaniu geomechanicznych metod badawczych zanalizowano szczególne cechy odporności oraz podatności opok na długotrwałe procesy deterioracji.

Słowa kluczowe: opoka, awaria, średniowieczne mury, wytrzymałość na ściskanie, szorstkość, zawilgocenie, konserwacja.

1. Wprowadzenie

Kazimierz Dolny jest znanym zabytkowym zespołem miejskim o głębokiej średniowiecznej tradycji budowlanej. Budownictwo jest ściśle związane z ówczesnym rozwojem miejscowego górnictwa i przetwórstwa opok, doskonałego i łatwego w obróbce surowca zwanego „białym kamieniem”. Rozwój budownictwa wspierało korzystne położenie na szlaku handlowym Wisły, prowadzącym z południa Europy do Bałtyku. Na stromych, malowniczych stokach jej przełomowego odcinka, wykształciło się w średniowieczu unikalne obronne, sakralne i gospodarcze budownictwo kamienne oparte na miejscowym łatwo dostępnym, węglanowym surowcu skalnym – opokach górnej kredy.

Na przestrzeni wieków wiele z tych obiektów uległo katastroficznym dewastacji, wiele zostało odrestaurowane i stanowi o unikalnym znaczeniu turystycznym rejonu Kazimierza Dolnego i jego specyficznej architektury, która reprezentuje XVI-wieczne przemiany podatnej na pożary architektury drewnianej w architekturę murowaną (rys. 1a, b, c).

Wiele obiektów zabytkowych jest współcześnie z trudem restaurowane, gdyż jeszcze w niedawnej przeszłości ich mury, stanowiąc dogodne źródło surowca kamiennego na inne cele gospodarcze, były dewastowane (rys. 2).



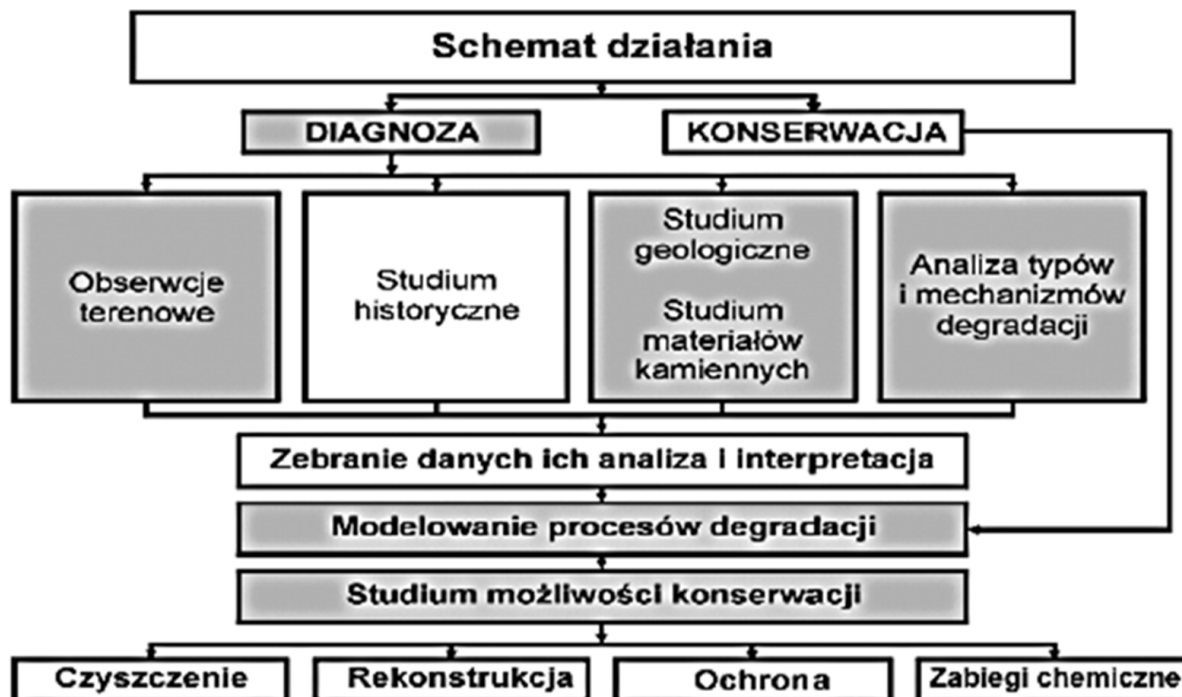
Rys. 1. Obiekty „białej” murowanej architektury Kazimierza Dolnego wykonane z lokalnego surowca – opoki: a) baszta, b) zamek, c) kościół Farny (fot. M. Kurowska)



Rys. 2. Zamek w Janowcu. Zbudowany w XVI w. przez Firlejów, stanowił kolejno własność Tarłów, Lubomirskich, Potockich, Osławskich. W latach 90. rozpoczęto powolne prace konserwacyjno-restauratorskie na rzecz Muzeum Nadwiślańskiego (fot. J. Pinińska)

Dzieje zamku w Janowcu i innych okolicznych kamiennych obiektów historycznych wskazują, że ochrona regionalnego dziedzictwa kulturowego związanego z nieznanym w innych regionach Polski budulcem kamiennym, stawia przed inwestorami oraz miejscowymi władzami złożone zadania. Jak zauważa bowiem w swych dziennikach klasyk rekonstrukcji historycznego budownictwa, Karol Estreicher, każdy wybór renowacji zabytkowej budowli musi być zaakceptowany społecznie. Ponieważ jednak nie ma jednej, unikalnej metody konserwatorskiej, sposób renowacji lub adaptacji musi być indywidualnie dostosowany do lokalnych warunków środowiska i funkcji społecznej. Oparty zatem na kompleksowej, interdyscyplinarnej wiedzy i współpracy specjalistów z wielu dziedzin. Istotą trudności jest zapewnienie stateczności obiektu zabytkowego. Jest to zadanie znacznie trudniejsze niż ma to miejsce w odniesieniu do obiektu nowego. Mamy tu bowiem do czynienia z budowlą o już naruszonej stabilności, co do której obowiązują szczególne wymogi zapewnienia zgodności historycznego ustroju budowlanego ze stosowanym surowcem konstrukcyjnym. Znaczącą rolę w tym

złożonym procesie wyboru renowacji konstrukcji kamiennych odgrywają badania geologiczne i geomechaniczne (rys. 3).

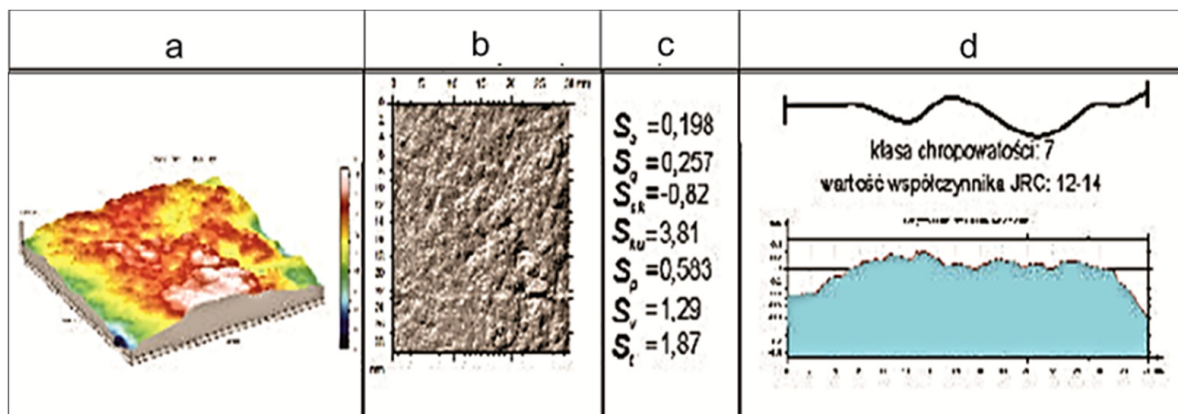


Rys. 3. Udział badań geologicznych i geomechanicznych w diagnostycznej analizie procesu konserwacji i rekonstrukcji obiektów kamiennych (oznaczony szarą barwą)

Na przykładzie kamiennej architektury Kazimierza Dolnego, przeanalizowano zatem współczesnymi metodami badawczymi szczególne cechy geomechaniczne charakteryzujące opoki – trwałe ale specyficzny surowiec budowlany regionalnej architektury średniowiecznej oraz czynniki starzenia się tego kamienia pod wpływem warunków środowiskowych w długiej skali czasowej. Wyeksponowano również te właściwości, które stanowią o ich odporności i przydatności budowlanej od średniowiecza po czasy współczesne.

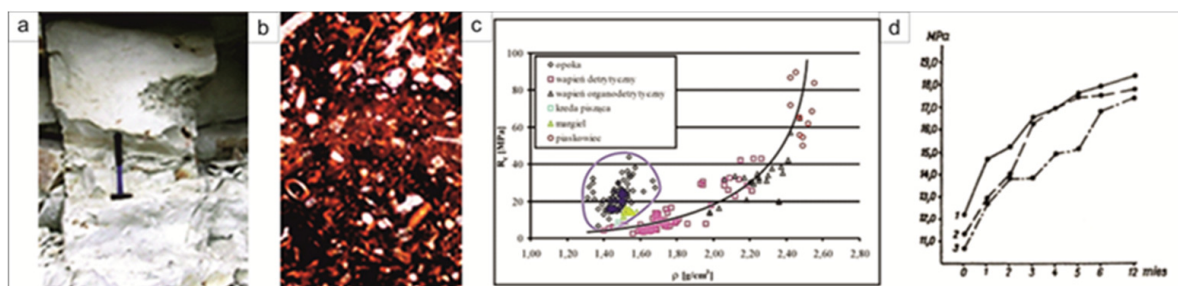
2. Właściwości geomechaniczne opok

Aczkolwiek wiedza o korzystnych właściwościach budowlanych opok, ma głębokie historyczne korzenie, to dopiero współczesne badania geomechaniczne pozwalają na ustalenie genezy ich nietypowego jak na tak słaby, w rozumieniu standardowej, [12], klasyfikacji wytrzymałościowej skał, surowiec budowlany, [5, 6, 7, 8]. Dla wyjaśnienia ich specyficznej przydatności budowlanej, próbki opok z Kazimierza Dolnego poddano kompleksowym, laboratoryjnym badaniom petrograficznym, ultradźwiękowym i fizyczno-mechanicznym oraz zbadano przejawy emisji akustycznej podczas ich pęknięcia pod obciążeniem. Na powierzchniach spękań ustalono profil morfologiczny powierzchni osłabienia za pomocą testu chropowatości przy użyciu profilometru firmy Hommer Werke i przedstawiono za pomocą programu HommelMap Basic (rys. 4). W badaniach mechanicznych zastosowano metodykę zalecaną przez Eurocode, zalecenia ISRM [2] oraz analizowano podatność opok na pęknięcie w przedkrytycznym i pokrytycznym stanie zniszczenia na tle przebiegu emisji akustycznej (AE).



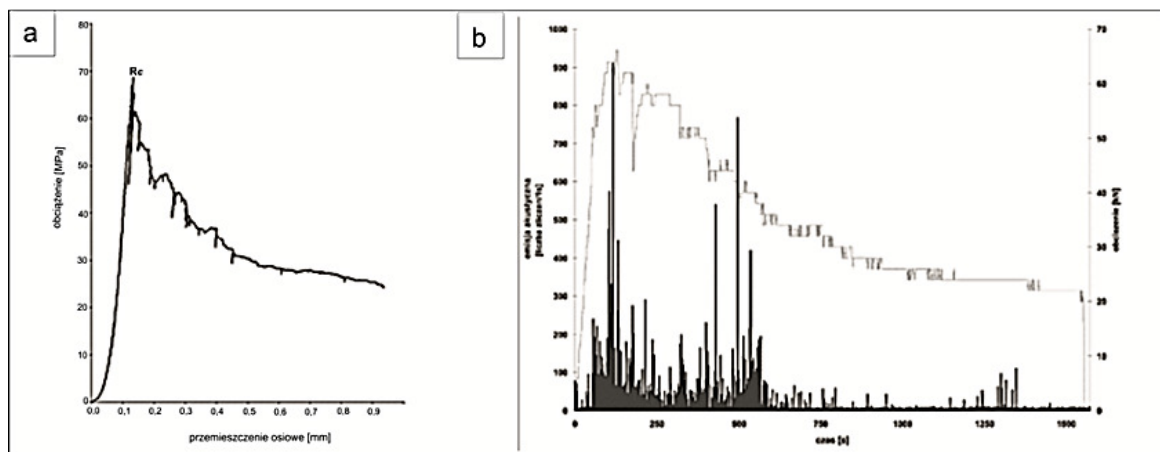
Rys. 4. Charakterystyka jakościowa i ilościowa szorstkości powierzchni spękań opok: a) diagramy 3D; b) diagramy 2D; c) parametry statystyczne chropowatości powierzchni; d) profile chropowatości oraz odpowiadające im wartości współczynnika JRC wg. klasyfikacji Bartona

Opoki, wykazujące w odsłonięciu korzystną bloczność (rys. 5a) należą do skał bardzo lekkich i lekkich (ρ_s od 1400 kg/m³ do 1600 kg/m³), wysoko porowatych ($n \sim 40\%$) i wytrzymałości rzędu 10–30 MPa. Klasyfikuje je to zgodnie z normą PN-EN -ISO-14689 do skał o niskiej i średniej wytrzymałości. Jednakże mikrytowa struktura opok z zawartością drobnych otworów i znaczną liczbą krzemionkowych igieł gąbek, obserwowana w obrazie mikroskopowym, tworzy strukturę szkieletową wypełnioną drobnym materiałem węglanowym (rys. 5b). Dzięki temu rusztowemu wzmocnieniu opoki są odporne na pękanie i na tle innych lokalnych surowców węglanowych o podobnej gęstości, są względnie wytrzymałe (rys. 5c). W miarę sezonowania opoki twardnieją. Wytrzymałość ich wzrasta z upływem czasu. Tę korzystną cechę opok znano i wykorzystywano w średniowieczu. Laboratoryjne badania W.C Kowalskiego, [3], W.C Kowalskiego i Łozińskiej-Stępień, [4], wskazują, że po kilkumiesięcznym okresie sezonowania wytrzymałość opok wzrasta nawet ponad 60% (rys. 5d).



Rys. 5. Korzystne właściwości opok. a) bloczność, b) mikrytowa struktura wzmocniona rusztem krzemionkowych igieł gąbek, c) relatywnie wysoka wytrzymałość na ściskanie (R_c) przy niskiej gęstości (ρ_s), d) twardnienie (wzrost R_c) w miarę sezonowania

Równocześnie ich duża porowatość sprawia, że stanowią doskonały materiał izolacyjny, a lekkość stanowi o łatwości obrabiania. Wzmocnienie wskutek krzemionkowego usztywnienia ich szkieletowej struktury potwierdzają badania wytrzymałościowe korelowane z badaniami emisji akustycznej (AE). Jak wynika z przebiegu deformacji przedkrytycznej obciążanych osiowo próbek opok z Kazimierza Dolnego, praktycznie do chwili osiągnięcia stanu granicznego (R_c) obserwuje się jedynie nieliczne przejawy kruchego zniszczenia (rys. 6a) co rejestrowane jest bardzo słabą przedkrytyczną aktywnością emisji akustycznej (rys. 6b).



Rys. 6. Przedkrytyczny i pokrytyczny przebieg niszczenia opok: a) krzywa deformacji, b) przebieg sygnałów emisji akustycznej na tle naprężenia

W stanie pokrytycznym opoki zachowują znaczną, dochodzącą do 50% maksymalnej wytrzymałości na ściskanie (R_c), wytrzymałość rezydualną (R_{rez}). Przebieg pokrytycznej ścieżki deformacji wskazuje jednak na pojawianie się podczas deformacji pokrytycznej, licznych drobnych defektów. Jest to niekorzystne, gdyż mikrospeknięcia nie tylko obniżają jakość materiału lecz stanowią drogi dla korozyjnej penetracji roztworów wodnych w głąb porowatej struktury opok. Korzystnym jest natomiast, że jak wykazują badania, [6], powierzchnie spekań wykazują dużą szorstkość. Zwiększa to opory tarcia, przeciwdziała rozpadowi uszkodzonych fragmentów i powoduje, że mimo postępującej deformacji wytrzymałość rezydualna utrzymuje się na stałym poziomie.

3. Odporność opok na działanie czynników środowiskowych

Odporność opok na powolną destrukcję (deteriorację) analizowano w oparciu o laboratoryjne badania geomechaniczne, modelujące wzajemne oddziaływania środowisko przyrodnicze/skała w warunkach lokalnych. Za istotne w warunkach środowiskowych Kazimierza Dolnego uznano oddziaływanie zmiennego klimatu kontynentalnego o przeważających w porze letniej dużych opadach (średnia roczna suma opadów ok. 550 mm) przy znacznej letniej insolacji białych murów (w temperaturze do 50°C) przy średniej temperaturze w zakresie $-5,0^{\circ}\text{C} - +18,7^{\circ}\text{C}$ [1] GMES.

Próbki opok poddano standardowym cyklicznym badaniom mrozoodporności, [9], odporności na szoki termiczne [11] oraz odporności na zawilgocenie, [10]. Następnie na próbkach skalnych wykonano badania wytrzymałościowe, [12], w stanie początkowym oraz po badaniach modelowych (sezonowaniu). Na tej podstawie wyznaczono wskaźnik deterioracji I_{Rc} (*Integrity Index*) wyrażony formułą:

$$I_{Rc} = (R_{cx}/R_{co})^2 \quad (1)$$

gdzie:

R_{co} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie ośrodka skalnego (*początkowa*),
 R_{cx} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie ośrodka skalnego po zakończeniu sezonowania.

Wskaźnik ten jest zależny od działającego czynnika środowiskowego. Jego wartości dla poszczególnych warunków sezonowania (czynników) przedstawiono w Tabeli 1. Porównanie

wskaźnika I_{Rc} , po sezonowania w danych warunkach środowiskowych, przy założeniu, że materiał nie poddany deterioracji cechuje wartość $I = 1$ wyraźnie wskazuje, że pod działaniem zamrozu oraz szoku termicznego w strukturze opok zachodzą znaczące zmiany.

Tabela. 1. Średnie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_c) opok z Kazimierza Dolnego w modelowanych warunkach badawczych

Warunki testu	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [MPa]	Index Integrity I_{Rc} [-]
stan początkowy R_{co} (PN-EN 1926)	26	
zamrażanie/rozmarzanie (R_{cm})	18,4	0,50
szok termiczny (R_{ct})	18	0,48
po nasiąkliwości (R_{cn})	23,2	0,80

Badania te wskazują zatem, że w zawilgoconym materiale, skutki inicjalnej deterioracji wywołane penetracją roztworów wodnych w strukturę opoki są wielokrotnie przez wahania temperatur tak dodatnich jak i ujemnych (zamróz, szok termiczny).

4. Przejawy niewłaściwej konserwacji

Z badań geomechanicznych wynika, że w stanie odkształcenia pokrywczego krzemionkowy szkielet opok ulega destrukcji przez co uruchamiane są drogi krążenia roztworów wodnych a w ślad za tym podatność na działanie zmian termicznych. Dzieje się tak szczególnie w strefach zawilgocenia, wskutek podsiąkania kapilarnego. Ze strefami tymi związana jest obecność mikroorganizmów i roślin oraz powstawanie agresywnych roztworów wodnych zmieniających barwę kamienia, wywołujących wykwit i przyczyniających się do rozsadzania i rozkruszania skały podczas sezonowych zmian klimatycznych. Problem ten jest w wielu przypadkach niedostrzegany, stąd fundamenty oraz dolne partie zabytkowych murów nie są zabezpieczane antykorozyjnie. Stąd w licznych zabytkowych budowlach, niskie partie murów, położone na kontakcie z nieosuszonym podłożem wykazują daleko posuniętą degradację (rys. 7a). Zjawiska te spotyka się nawet na świeżo odnowionych obiektach, w których skorodowana i przebarwiona powierzchnia muru u podstawy, stanowi dysonans z pozostałą odnowioną częścią konstrukcji (rys. 7a, b, c i d).



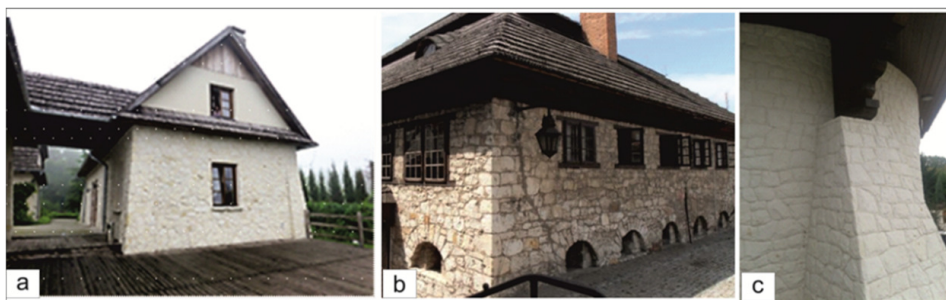
Rys. 7. a) Zawilgocone i przebarwione fragmenty murów Zamku b) i c) pokrywanie tynkiem odnowionych powierzchni murów (dawny spichlerz zbożowy), d) brak drenażu.

Poza brakiem należytego drenażu i odpowiedniej izolacji zabezpieczającej powierzchnie murów przed wilgocią, postęp degradacji pogłębia pokrywanie kamiennych murów tynkami uniemożliwiającymi ich „oddychanie” i wysuszanie. Tynki te nie tylko zacierają unikalny charakter murów kamiennych lecz łuszczą się i odpadają co wielokrotnie jest inspiracją do aktów wandalizmu (rys. 8).



Rys. 8. Przykłady łuszczenia tynków na kamiennych murach zabytkowych kamienic związane z tym akty wandalizmu

Rozwój nowoczesnych technologii w budownictwie oraz rozwój globalnej dystrybucji kamieni dekoracyjnych o dużej wytrzymałości wyparty z czasem średniowieczną powszechność użytkowania opok w regionalnym budownictwie Kazimierza. Jest ona powoli przywracana w lokalnym, stylowym budownictwie na peryferiach kazimierzowskiej starówki (rys. 9 a i b) oraz dzięki wznowieniu prac konserwatorskich, (rys. 9 c).



Rys. 9. a) Fragmenty współczesnego hotelu w Kazimierzu Dolnym; b) odnowiona Synagoga, c) zabezpieczony przed wilgocią i podsiąkaniem stylowy mur oporowy w nowym budownictwie

Należy jednak pamiętać, że zastosowanie opok wymaga ich sezonowania po wydobyciu ze złoża, a w konstrukcjach murowych zabezpieczenia przed nawilgoceniem. W urozmaiconej morfologii Kazimierza istotne jest również właściwe posadowienie i stosowanie wzmocnień i murów oporowych zgodnie ze średniowieczną sztuką budowlaną. Spękanie oraz rozszczepianie murów i wypadanie zapraw łączących bloki skalne na skutek przemieszczania się podłoża na stromo nachylonych zboczach, uruchamia bowiem krążenie korozyjnych roztworów. Poza zagrożeniem osuwiskowym przyczynia się to do niszczenia struktury opok, które stają się bardziej wrażliwe na klimatyczne i antropogeniczne działania korozyjne.

Wnioski

Badania geologiczne i geomechaniczne oparte na specjalistycznych badaniach mikroskopowych, ultradźwiękowych i wytrzymałościowych oraz emisji akustycznej w nawiązaniu do oceny wpływu lokalnych czynników środowiskowych wskazują korzystne cechy opok, stanowiące o ich wartości jako surowca budowlanego w średniowieczu: dostępność, bloczność, urabialność, lekkość, właściwości izolacyjne i relatywnie wysoka wytrzymałość.

Zapobieganie awariom konstrukcji murowych wymaga zabezpieczenia ich dolnych partii przed nawilgoceniem, a na stromych zboczach przełomowego odcinka Wisły stosowania wzmocnień i murów oporowych zgodnie ze średniowieczną sztuką budowlaną. Po przekroczeniu granicznej wartości wytrzymałości rezydualnej wywołanej tak nadmiernymi przemieszczeniami się podłoża jak i wzrostem obciążenia, uszkodzona zostaje bowiem

porowata struktura opoki, bez widocznych objawów zewnętrznych. Mury stają się wtedy podatne na migrację roztworów wodnych, korozję, osłabienie wytrzymałości i finalną utratę stateczności. Pokrywanie istniejących konstrukcji murowych tynkami zewnętrznymi jest działaniem szkodliwym, gdyż indukuje procesy korozji podtynkowej.

Literatura

1. GMES: Global Atmospheric Composition /web-portal/, 2012.
2. ISRM: Suggested Methods for Determining the Fracture Toughness of Rock. Commission on Testing Methods, 1988.
3. Kowalski W.C. Wytrzymałość na ściskanie budowlanych skał senońskich przełomowego odcinka Wisły środkowej na tle ich litologii. Biul. Geol. Wydz. Geol. UW., 1, cz. 2. Warszawa, 1961.
4. Kowalski W.C., Łozińska-Stępień. Litologia skał górnokredowych doliny Wisły środkowej i wyżyn przyległych. Mat. Sympozjum w Kazimierzu Dolnym, NOT. Katowice, 1965.
5. Pinińska J., Dziedzic A. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz.V. Region lubelski. Katalog. T.9. Warszawa, 2006.
6. Pinińska J., Dziedzic A. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz.V. Region lubelski. Objasnienia i interpretacja. T.10. Warszawa, 2007.
7. Pinińska J. The Lublin Siliceous Carbonate Rocks – a Medieval Building Material, its Geological Setting, Specific Properties and Deterioration Processes. 11-th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Vol. 1. Nicolaus Copernicus University press. Toruń. Poland. 725–732, 2008.
8. Pinińska J. Górnictwo skalne region lubelskiego. Zniszczenie czy rozwój? Prace I Studia Geograficzne. T.44. 153–167. Warszawa, 2010.
9. PN-EN 12371. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie mrozoodporność
10. PN-EN 13755. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym
11. PN-EN 14066. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane szokiem termicznym.
12. PN-EN ISO 14689. Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie skał. Część 1: Oznaczanie i opis.

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF BUILDING PROPERTIES SILICEOUS LIMESTONE ROCKS (OPOKA) OF REGION KAZIMIERZ DOLNY AND THEIR HISTORICAL IMPORTANCE

Abstract: The central Vistula valley is a specific region of Poland where a unique style of the Middle Age stone architecture has developed. A significant impact on economic development of the area has been made by the availability of Upper Cretaceous siliceous limestone rocks (opoka), commonly known as a "white stone". Easily accessible, exposed slopes of the river as well as a well-known water trade route from southern Europe to the Baltic Sea has been favourable to building industry prosperity. Based on the example of opoka – stone architecture of the urban historic complex of Kazimierz Dolny, modern research methods were applied to an analysis of geomechanical qualities of this special rock. The research aim was oriented on determination of natural factors the most responsible for opoka's resistance to destruction in the long time scale and for the local geoenvironmental conditions impact. Complex laboratory geomechanical researches of opoka rocks: petrographic analyses, ultrasonic and mechanical tests, roughness; were carried out together with acoustic emission during rock fracture under load. The results fully confirm the specific properties of opoka and explain their widespread use in the medieval local stone architecture. However the tests results show that opoka retain a long significant residual strength, but in the long time scale are sensitive for cyclic humidity and temperature changes. Therefore, keeping the stone walls dry and never cover by plaster is necessary for securing them against the failure and for proper conservation of the historic, masonry monuments structure.

Keywords: siliceous limestone (opoka), failure, medieval masonry, compression strength, roughness, moistness, stability protection and conservation.