

Marcin Stankiewicz

Zastosowanie badań ultradźwiękowych do analizy procesów korozyjnych skał węglanowych synkliny bolechowickiej

Application of ultrasonic tests of limestones' from bolechowicka syncline for corrosion processes analysis

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań podatności na procesy korozyjne skał węglanowych z kamieniołomu Trzuskawica oraz Modrzewie eksploatujących „kamień wapienny” wieku dewońskiego stosowany w budownictwie. Przedmiotem pracy są wyniki badań laboratoryjnych stopnia degradacji tych skał pod wpływem czynników antropogenicznych. Celem tych badań było ustalenie, w jakim stopniu korozja naturalnych ścian kamieniołomów jest indukowana przez procesy antropopresji w czasie migracji roztworów przez spękania i szczeliny masywu skalnego. W warunkach laboratoryjnych symulowano wpływ roztworów dwutlenku siarki i siarczynu sodu na korozję powierzchni próbek skał oraz ich stopniową utratę wytrzymałości. Dzięki zastosowaniu badań nieniszczących, jakimi są badania ultradźwiękowe, ustalono trendy degradacji wytrzymałościowej mierzonej zmianami prędkości fali ultradźwiękowej podłużnej (V_p).

Zmienność prędkości V_p skorelowano z początkowymi i finalnymi wartościami wytrzymałości (R_c) i wykazano różnice w postępie korozji skał w zależności od położenia materiału skalnego w profilu pionowym kamieniołomów oraz zastosowanego czynnika korozyjnego.

W badaniach starano się nawiązać, na ile to było możliwe, do zaleceń zawartych w normach służących badaniom odporności kamienia naturalnego na procesy starzenia spowodowane działaniem SO_2 w obecności wilgoci (PN-EN 13919) oraz krystalizacją soli (PN-EN 12370).

Słowa kluczowe: procesy korozyjne, badania ultradźwiękowe, starzenie, wytrzymałość na ściskanie, fala podłużna

Abstract: This article presents investigation results of the influence of corrosion simulations carried on limestones from Trzuskawica quarry and Modrzewie quarry, where this material is excavated for construction industry. This work presents laboratory results of degradation stage such limestones caused by anthropogenic factors.

Purpose of this work was evaluation of influence of anthropogenic processes on corrosion of the exploited, open quarry walls during transportation of different solutions through joints and cracks of the rock massif.

Research were carried in laboratory conditions determining influence of sulfur dioxide and sodium sulfate solutions on surface corrosion of rock samples and partial decreasing of their compressive strength. Due to non destructive tests, such as ultrasonic tests, it was possible to obtain trends in strength degradation of this rock samples measured by changes of the longitudinal waves velocity (V_p). These changes were correlated with initial and final compression strength and are showing differences in corrosion intensity determined by different collection places and used anthropogenic factor. Research was as close as possible to instructions given in European standards: Determination of resistance to ageing by SO_2 action in the presence of humidity (PN-EN 13919) and Determination of resistance to salt crystallization (PN-EN 12370).

Key words: corrosion processes, ultrasonic tests, ageing, compressive strength, longitudinal wave

Wstęp

Podatność skał na korozję w danych warunkach hydrogeochemicznych jest ważnym elementem oceny przekształcania się właściwości masywu skalnego na skutek penetracji roztworów w jego pory i szczeliny. Krążące wody zmieniają charakter powierzchni szczelin oraz wypełniającego je materiału. W warunkach otwartych ścian kamieniołomów procesy naturalnego krążenia są wzbudzone odprężeniem masywu oraz narażeniem na bezpośredni wpływ czynników antropogenicznych ścian odsłoniętych eksploatacją (Drażkowski, 1981). Stąd badania odporności materiału skalnego na procesy korozyjne są ważnym elementem oceny stateczności masywu, a także określenia czynników wpływających na drożność jego szczelin. Badania tego typu są również ważnym elementem oceny trwałości kamiennych konstrukcji i ich elementów w budownictwie oraz zabytkach (Pinińska, Łukaszewski, 2005).

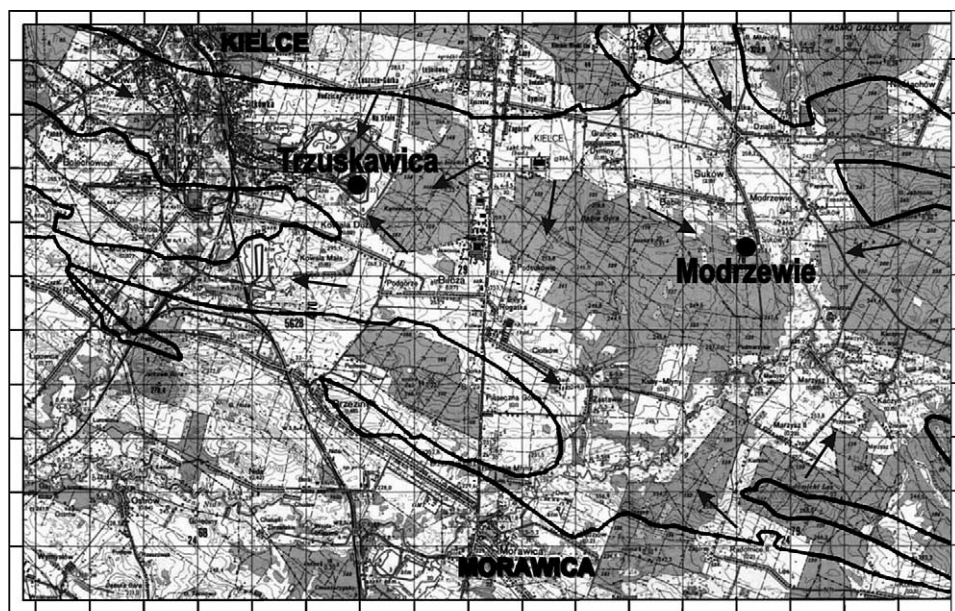
Przedmiotem badań wpływu procesów korozyjnych były dewońskie wapienie pelitowe, stromatoporoidowo-koralowcowe występujące w synklinie bolechowickiej.

Synklina bolechowicka jest częścią większej struktury – synkliny gałęzicko-bolechowicko-borkowskiej i graniczy od północy z kambryjsko-sylurską antykliną dymińską, a od południa z antykliną chęcińską. Podłoże synkliny bolechowickiej stanowią utwory paleozoiczne: kambru, ordowiku i syluru reprezentowane przez ilowce, mułowce i łupki. Głównymi osadami wypełniającymi synklinę są utwory dewońskie – piaskowce i kwarcyty dewonu dolnego, dolomity margliste, dolomity gruboławicowe i wapienie dewonu środkowego, a także wapienie, margle i łupki margliste dewonu górnego. Jądro synkliny wypełniają łupki wieku karbońskiego, na których niezgodnie spoczywają zlepieńce wapienne oraz margle i łupki permu. Najmłodsze osady występujące w synklinie bolechowickiej tworzy kompleks utworów czwartorzędowych, które stanowią piaski i żwiry lodowcowe i wodnolodowcowe, płyty glin zwałowych oraz, w dolinach rzek, piaski, żwiry i mułki rzeczne.

Synklina bolechowicka tworzy zamkniętą jednostkę hydrogeologiczną, której najważniejsze ogniwo stanowią wapień i dolomity dewonu środkowego i górnego, budujące główny użytkowy poziom wodonośny na tym terenie, będące jednocześnie głównym surowcem skalnym eksploatowanym na tym obszarze. Odpowiednie parametry hydrauliczne masywu oraz dobra jakość wód podziemnych były podstawą wydzielenia na tym obszarze Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 418 „Gałęzie–Bolechowice–Borków”.

Ze względu na brak ciągłej pokrywy izolującej od powierzchni terenu główny użytkowy poziom wód podziemnych jest podatny na zanieczyszczenie, a skały dewońskie są bezpośrednio narażone na wpływ antropopresji, szczególnie gdy eksploatacja górnicza otwiera nowe drogi krążenia wód.

W celu zbadania właściwości materiału skalnego na drodze krążenia wód przez dewoński masyw skalny pobrano próbki z dwóch kamieniołomów zlokalizowanych w centralnej oraz wschodniej części omawianej struktury geologicznej (ryc. 1). W pierwszym z nich (kamieniołom Truskawica) pobrano próbki z trzech kolejnych, coraz głębszych poziomów eksploatacyjnych (I, II, III); I poziom odpowiada strefie powierzchniowej, którą ponownie uchwyciono w drugim miejscu poboru materiału (kamieniołom Modrzewie).



- miejsca poboru próbek skał (location of rock material collection places)
- ↘ granica synkliny Bolechowicko-Borkowskiej (border of the Bolechowicko-Borkowska syncline)
- ↖ kierunki przepływu wód podziemnych (groundwaters flow directions)

Ryc. 1. Lokalizacja miejsc poboru materiału skalnego do badań na tle schematu warunków krążenia wód

Fig. 1. Location of rock material collection places for research purposes on scheme of the general water flow conditions

Właściwości materiału skalnego

Badania laboratoryjne materiału skalnego prowadzono na próbkach cylindrycznych o średnicy i wysokości ~ 50 mm. W badaniach wstępnych, korzystając z norm PN-66/B-04100 oraz PN-85/B-04101, oznaczono podstawowe cechy fizyczne materiału skalnego, takie jak: gęstość, nasiąkliwość wagowa, nasiąkliwość objętościowa i porowatość (tab. 1).

Określono również początkową prędkość przebiegu podłużnej fali ultradźwiękowej w pomiarze prostokątnym (\perp), jak też równoległym (\parallel) do osi próbek oraz wyznaczono współczynnik anizotropii (A) tej fali (tab. 2).

Wstępne badania wykazały podobieństwo cech materiału z powierzchniowego poziomu w Truskawicy (I) do materiału z Modrzewi. Natomiast pobór próbek z trzech poziomów eksploatacyjnych kamieniołomu Truskawica wskazuje na wzrost zarówno nasiąkliwości, jak i porowatości tych skał wraz z głębokością. Mniejszą porowatość i nasiąkliwość próbek z górnych partii masywu (poziom I) należy wiązać z bardziej zaawansowanymi procesami wietrzenia i wypełniania substancją ilastą szczelin i mikroszczelin w strefie powierzchniowej.

Kontrolne badania ultradźwiękowe wykazały, że materiał skalny z obu kamieniołomów w stanie „naturalnym” charakteryzuje prędkość fali podłużnej od 4687 do 5087 m/s. Stwierdzono również, że skały te cechuje niewielka anizotropia w granicach do 400 m/s, co uwidacznia współczynnik anizotropii zmieniający się w granicach od 0,94 do 1,06.

Tabela 1. Podstawowe cechy fizyczne

Table 1. Basic physical features

Miejsce poboru	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Nasiąkliwość wagowa %	Nasiąkliwość objętościowa %	Porowatość %
Truskawica poziom I	2,679	0,12	0,33	1,86
Truskawica poziom II	2,677	0,14	0,37	1,93
Truskawica poziom III	2,676	0,20	0,53	1,97
Modrzewie	2,679	0,13	0,35	1,87

*przyjęto gęstość właściwą 2,73 wg Kozłowski (1981)

Tabela 2. Początkowa prędkość fali ultradźwiękowej

Table 2. Initial ultrasonic wave velocity

Miejsce poboru prób	Stan po wysuszeniu – wartości średnie		
	V _p		A
	\perp [m/s]	\parallel [m/s]	
Truskawica poziom I	4757	5087	0,94
Truskawica poziom II	4961	4687	1,06
Truskawica poziom III	4981	4768	1,04
Modrzewie	4841	4951	0,98

Symulacje procesów korozyjnych

W celu zbadania wpływu czynników korozyjnych na zmianę parametrów wytrzymałościowych badanych próbek skał przeprowadzono testy symulujące wpływ SO_2 i $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ jako czynników, które można wiązać z powszechnymi zagrożeniami antropogenicznymi, takimi jak opad kwaśnych deszczów czy zimowe utrzymanie dróg lub nawożenie pól. Badania prowadzone były każdorazowo na trzech próbkach danego rodzaju skały wg metodologii przedstawionej w normach służących do badań odporności kamienia naturalnego na procesy starzenia: „Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane działaniem SO_2 w obecności wilgoci” (PN-EN 13919) oraz „Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli” (PN-EN 12370). Oznaczeń starano się bowiem dokonywać w miarę możliwości w sposób zunifikowany wg norm europejskich, aby zapewnić jak największą porównywalność wyników.

W trakcie badań wykonano 15 cykli nasycania i osuszania próbek poddanych działaniu roztworu soli oraz 21-dniowy cykl oddziaływania dwutlenku siarki na próbki skał, w którym stosowano dwa roztwory o różnych stężeniach SO_2 (roztwór A o wyższym stężeniu SO_2 i roztwór B o niższym stężeniu SO_2).

Po przeprowadzeniu cykli badawczych pomierzono prędkości fali ultradźwiękowej oraz poddano próbki badaniu jednoosiowego ściskania. Wyniki pomiarów kontrolnych podłużnej fali ultradźwiękowej po badaniu krystalizacji soli ($V_{pp\text{Na}_2\text{SO}_4}$) przedstawiono w tabeli 3, zaś wyniki uzyskane po badaniach wpływu SO_2 ($V_{pp\text{SO}_2}$) zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 3. Prędkość fali ultradźwiękowej $V_{pp\text{Na}_2\text{SO}_4}$

Table 3. Ultrasonic wave velocity $V_{pp\text{Na}_2\text{SO}_4}$

Miejsce poboru prób	V_p		A
	\perp [m/s]	\parallel [m/s]	
Trzuskawica poziom I	5502	5353	1,03
Trzuskawica poziom II	5389	5455	0,99
Trzuskawica poziom III	5544	5749	0,96
Modrzewie	5791	5792	1,00

Tabela 4. Prędkość fali ultradźwiękowej $V_{pp\text{SO}_2}$

Table 4. Ultrasonic wave velocity $V_{pp\text{SO}_2}$

Miejsce poboru prób	Roztwór A			Roztwór B		
	V_p		A	V_p		A
	\perp [m/s]	\parallel [m/s]		\perp [m/s]	\parallel [m/s]	
Trzuskawica poziom I	5507	5467	1,01	5565	5746	0,97
Trzuskawica poziom II	5749	6058	0,95	5605	5269	1,06
Trzuskawica poziom III	5749	5867	0,98	5769	5974	0,97
Modrzewie	5811	5816	1,00	5727	5756	0,99

Pomiary wytrzymałości na ściskanie (R_c) uzyskane w badaniach próbek za pomocą sztywnej prasy wytrzymałościowej MTS 815 przedstawiono w tabeli 5.

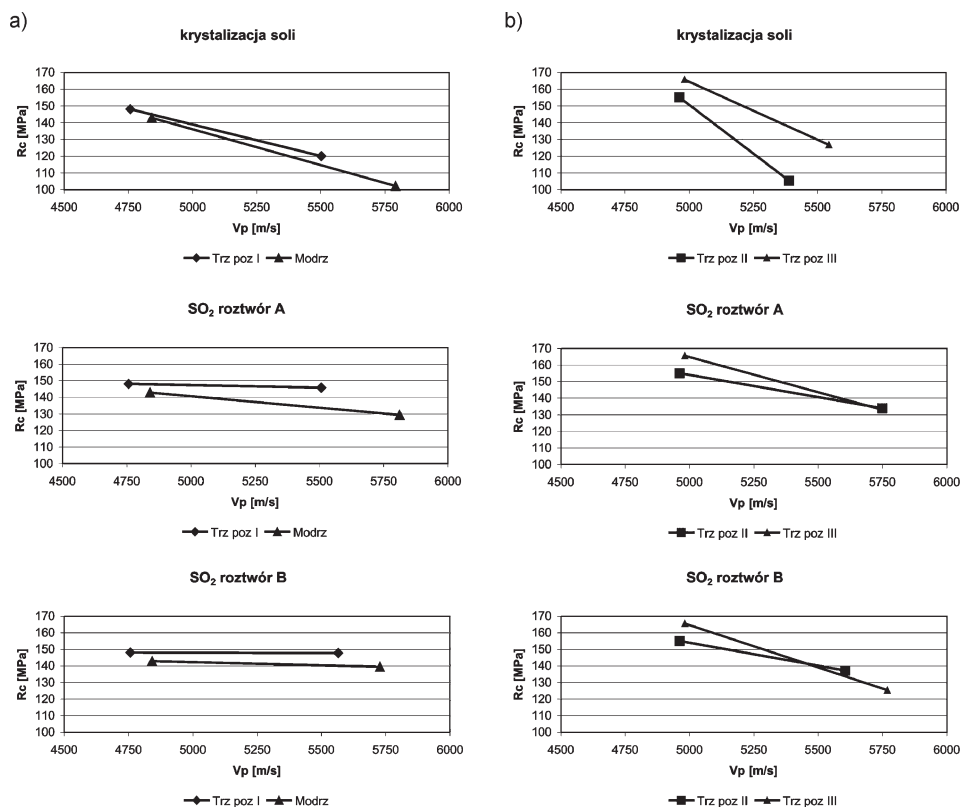
Badania ultradźwiękowe wszystkich rodzajów próbek skalnych wykazały wzrost prędkości przebiegu fali podłużnej V_p zarówno w pomiarach dotyczących wpływu krystalizacji soli, jak i badaniach wpływu SO_2 . Natomiast najsilniej na zmianę wytrzymałości R_c oddziaływały procesy krystalizacji soli (ryc. 2). Pomiary wykazały podobieństwo zachowania się materiału skalnego z I poziomu kamieniołomu Trzuskawica oraz kamieniołomu Modrzewie (ryc. 2a). Próbki skał z poziomów głębszych (II i III poziom kamieniołomu Trzuskawica – ryc. 2b) wykazały natomiast większą niż mniej nasiąkliwe i porowate skały w poziomie I podatność na procesy korozyjne. Uwidacznia to większe w stosunku do materiału ze stref powierzchniowych obniżenia zarówno wytrzymałości na ściskanie (R_c), jak i prędkości V_p podłużnej fali ultradźwiękowej (ryc. 2a). Zjawisko to należałoby wiązać z mniejszym rozwojem procesów wietrzeniowych na II i III poziomie eksploatacyjnym Trzuskawicy i stanowi ono potwierdzenie mniejszego wypełnienia ich szczelin i porów. Ze względu na większe możliwości penetracji i oddziaływania roztworów na te strefy masywu skalnego będą one w warunkach naturalnych korodowane.

Szczegółowa analiza wyników badań dla każdego rodzaju materiału skalnego wskazuje, że najbardziej podatne na procesy krystalizacji soli są próbki z kamieniołomu Modrzewie oraz próbki z II poziomu kamieniołomu Trzuskawica. Z kolei najbardziej odporne na działanie soli okazały się próbki z poziomu III kamieniołomu Trzuskawica.

Wpływ SO_2 na badane skały okazał się mniejszy niż oddziaływanie procesów krystalizacji soli, aczkolwiek również pod wpływem tworzącego się kwasu siarkawego następuje zmniejszenie wytrzymałości materiału. W pomiarach oddziaływania roztworu A na skały największą odporność wykazał materiał z I poziomu kamieniołomu Trzuskawica, natomiast najbardziej podatne były próbki z poziomu III kamieniołomu Trzuskawica oraz z kamieniołomu Modrzewie. Roztwór B w małym stopniu wpływał na skały strefy powierzchniowej (poziom I kamieniołomu Trzuskawica i kamieniołomu Modrzewie). Najsilniejsze jego oddziaływanie uwidoczniło się w przypadku skał z III poziomu Trzuskawicy.

Tabela 5. Wyniki badań jednoosiowego ściskania
Table 5. Results of uniaxial compression tests

Czynnik	R_c [MPa]			
	Modrzewie	Trzuskawica		
		poz. I	poz. II	poz. III
sól	102,2	120,1	105,3	126,8
SO_2 roztwór A	129,3	145,9	133,9	133,1
SO_2 roztwór B	139,6	147,8	137,2	125,4
stan „naturalny”	142,8	148,1	155,1	165,7



Ryc. 2 Zmiany wytrzymałości na ściskanie (Rc) i prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej (Vp) po symulacji procesów korozyjnych w wapieniach dewonu: a) poziom I kamieniołomu Trzuskawica oraz kamieniołom Modrzewie, b) poziom II i III kamieniołomu Trzuskawica

Fig. 2. Compressive strength changes (Rc) and longitudinal ultrasonic wave velocity changes (Vp) after corrosion simulations on Devonian limestones: a) I-st excavation level in Trzuskawica quarry and Modrzewie quarry, b) II-nd and III-rd excavation levels in Trzuskawica quarry

Podsumowanie

Badania wpływu procesów korozyjnych na skały węglanowe synkliny bolechowickiej prowadzono, symulując oddziaływanie krystalizacji soli i SO₂. Stwierdzono wzrost prędkości Vp podłużnej fali ultradźwiękowej wskazujący na rozsadzanie, a następnie kolmatowanie przestrzeni porowej i szczelinowej skał wywołane wpływem obu czynników degradujących. Cykliczne rozpuszczanie, wytrącanie się oraz rekrytalizacja materiału w porach i szczelinach obniża wytrzymałość ośrodka, ułatwiając równocześnie propagację fali ultradźwiękowej.

Na procesy korozji skał węglanowych w badanych warunkach podatne są szczególnie głębsze strefy masywu skalnego (poziom II i III kamieniołomu Trzuskawica). W wyniku interakcji skał z czynnikami antropogenicznymi w wapieniach dochodzi do utraty około 30% wytrzymałości pierwotnej i zjawisko to jest szczególnie silne w przypadku roztworu soli, natomiast mniej intensywne w wyniku oddziaływania dwutlenku siarki.

Literatura

- Drągowski A., 1981. Inżyniersko-geologiczna charakterystyka niszczenia skał masywowych Wyżyny Lubelskiej w wyniku pęcznienia i skurczu. *Biuletyn Geologiczny* 29: 5–103.
- Kozłowski S., 1981. Katalog węglanowych złóż surowców wiążących w Polsce. *Wyd. Geol. Warszawa*, s. 1–53.
- Pinińska J., 1994. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego .1. Katalog. *Z. Geom. IHiGI. W. Geol. UW. Warszawa*. 1–99.
- Pinińska J., 1995. Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego. 2. Objasnienia i interpretacja. *Z. Geom. IHiGI. W. Geol. UW, Warszawa*, s. 1–170.
- Pinińska J., Łukaszewski P., 2005. Wietrzeniowa degradacja obiektów kamiennych na przykładzie wapienia detrytycznego z Józefowa. *Mat. konferencji: „Historia i współczesność górnictwa na terenie Lubelszczyzny”*, Kazimierz Dolny n. Wisłą, s. 138–147.
- Polska Norma PN-EN 13919. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na starzenie spowodowane działaniem SO_2 w obecności wilgoci. PKN i M Warszawa.
- Polska Norma PN-EN 12370. Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie odporności na krystalizację soli. PKNiM, Warszawa.
- Polska Norma PN-66/B04100. Oznaczanie gęstości pozornej, porowatości i szczelności. PKNiM, Warszawa.
- Polska Norma PN-85/B04101. Oznaczanie nasiąkliwości wodą. PKNiM, Warszawa.