

ANNA SMOLEŃSKA*, MAREK REMBIŚ**

Podatność wybranych piaskowców na ich strukturalne wzmocnienie

Słowa kluczowe

Konserwacja piaskowca, strukturalne wzmocnienie

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wykształcenia mikrostrukturalnego i wybranych właściwości fizyczno-mechanicznych piaskowców poddanych wzmocnieniu strukturalnemu. Metoda ta polega na wprowadzeniu w przestrzeń porową skały różnego rodzaju związków, które krystalizując wiążą przynajmniej częściowo składniki szkieletu ziarnowego. Celem wzmocnienia zniszczonych stref skały jest osiągnięcie w nich właściwości fizyczno-mechanicznych zbliżonych do występujących w częściach niezmiennych. Badania wykonano na próbkach pobranych ze złóż piaskowców: istebniańskiego (złoże „Droginia”), godulskiego (złoże „Straconka”) i szydłowieckiego (kamieniołom „Podkowiński”). Przedstawiono zależność pomiędzy ich zróżnicowanym wykształceniem litologicznym a zmianą właściwości fizyczno-mechanicznych, wywołaną oddziaływaniem różnych środków wzmocniających. Uzyskane wyniki badań dla skał niezmiennych stanowią przesłanki do wnioskowania o skuteczności zabiegu wzmocnienia przeprowadzanego w różnych typach zniszczonych piaskowców występujących w obiektach zabytkowych.

Wprowadzenie

Metoda strukturalnego wzmocnienia zniszczonej i osłabionej skały polega na wprowadzeniu w jej przestrzeń porową różnego rodzaju związków, które krystalizując wiążą przynajmniej częściowo składniki szkieletu ziarnowego. Celem wzmocnienia rozluźnionych stref skały jest osiągnięcie w nich właściwości fizyczno-mechanicznych zbliżonych do występujących w częściach niezmiennych. Ponadto zabieg ten powinien doprowadzić do wypełnienia przestrzeni porowej skały nowymi, wykrysztalizowanymi składnikami w miejsce usuniętych minerałów

* Dr inż., ** Dr, Zakład Złóż Surowców Skalnych, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków.

spoiwa. Hamuje lub ogranicza to wnikanie agresywnych roztworów w głąb skały, przy jednoczesnym zachowaniu paroprzepuszczalności. Metoda ta jest jednym z podstawowych elementów składowych programu konserwatorskiego, prowadzącego do zahamowania postępującej destrukcji kamienia w obiektach zabytkowych.

Skuteczność wzmacniania strukturalnego w dużej mierze zależy od zastosowanych preparatów. W stanie nieutwardzonym powinny one odznaczać się niską lepkością, dobrą penetracją i zwilżalnością, a po stwardnieniu zachowywać istotne właściwości skały, takie jak: paroprzepuszczalność i współczynnik rozszerzalności cieplnej. Ponadto nie mogą oddziaływać szkodliwie na składniki skały ani na zmianę jej zabarwienia oraz podlegać wpływow warunków atmosferycznych. Głębokość impregnacji środkami wzmacniającymi zależy również od rodzaju skały i stopnia jej zniszczenia.

Badania wykonano dla wybranych piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydłowieckiego, które powszechnie występują w obiektach zabytkowych. W pracy przedstawiono zależność pomiędzy ich zróżnicowanym wykształceniem litologicznym a zmianą właściwości fizyczno-mechanicznych, wywołaną oddziaływaniem różnych środków wzmacniających. W tym celu badania wykonano na próbkach pobranych ze złóż, a nie z zabytkowych obiektów kamiennych. Wyeliminowano w ten sposób wpływ oddziaływania czynników niszczących na zmianę właściwości fizyczno-mechanicznych wzmacnianych skał. Kierowano się również możliwościami uzyskania odpowiedniej ilości materiału badawczego, która była zapewniona jedynie w złożach. Uzyskane wyniki badań dla skał niezmiennych stanowią przesłanki do wnioskowania o skuteczności zabiegu wzmacniania przeprowadzanego w różnych typach zniszczonych piaskowców występujących w obiektach zabytkowych.

1. Metodyka badań

Do badań wybrano piaskowce pochodzące ze złóż, będących na przełomie XIX i XX wieku znanymi ośrodkami produkcji kamienia, znajdującego powszechne zastosowanie w budownictwie architektonicznym (Bolewski 1954; Urban, Gałol 1994). Są nimi piaskowce: istebniański ze złoża „Droginia”, godulski ze złoża „Straconka” i szydłowiecki z kamieniołomu „Podkowiński”. Z wymienionych piaskowców wycięto zestaw kostek, z których każdą opłukano z pyłu powstałego w trakcie cięcia i wysuszono w temperaturze pokojowej. Następnie zostały one pokryte powierzchniowo preparatami do wzmacniania strukturalnego skał lub dla porównania środkami przeznaczonymi do wzmacniania betonu. Odrębną serią próbek dla celów kontrolnych (porównawczych) były kostki piaskowców, które nie zostały poddane impregnacji. Uzyskane dla nich wyniki badań stanowiły odniesienie do danych otrzymanych z pozostałych próbek wzmocnionych piaskowców.

Wzmacnianie strukturalne piaskowców wykonano płynnymi preparatami: ASOLIN-OH 30 firmy Schomburg oraz FUNCOSIL STEINFESTIGER 510 firmy Remmers, stosowanymi obecnie w konserwacji kamienia. Eksperymentalnie zastosowano środki do powierzchniowego wzmacniania betonu: płynny ASHFORD FORMULA firmy Curecrete Chemical Company oraz pastę firmy Schomburg, dla której wszczęte jest postępowanie akceptacyjne. Każdy z wymienionych preparatów, zgodnie z zaleceniem producentów, nanoszono bez przerw przy

użyciu pędzla aż do całkowitego nasycenia powierzchni próbek wszystkich typów piaskowców. Dalsze ich badania rozpoczęto po upływie 21 dni od impregnacji. Należy podkreślić, że nie były one prowadzone w celu testowania ani też porównywania wyżej wymienionych preparatów, lecz wykonywano je dla oceny podatności odmiennie wykształconych piaskowców na oddziaływanie różnych środków wzmacniających. W tym celu przy prezentacji wyników badań nie posługiwano się nazwami preparatów, a jedynie ich literowymi kodami: A, B, C, D.

Dla piaskowców wykonywane były badania petrograficzne w mikroskopie optycznym oraz mikrostrukturalne (SEM) w skaningowym mikroskopie elektronowym TESLA BS-340. Ponadto oznaczono dla nich nasiąkliwość wagową i objętościową według PN-85/B-04101 oraz ścieralność na tarczy Boehmego według PN-84/B-04111. Obserwacje SEM umożliwiły określenie głębokości wnikania zastosowanych preparatów oraz sposobu i charakteru wypełnienia przestrzeni porowej we wzmocnionej strefie przypowierzchniowej w stosunku do ich części wewnętrznej oraz względem piaskowców nie poddanych impregnacji. Stopień wzmocnienia powierzchni piaskowców oceniano poprzez określenie zmniejszenia ścieralności na tarczy Boehmego próbek utwardzonych w odniesieniu do próbek nie poddanych temu zabiegowi. Dodatkowym jego efektem może być hydrofobizacja powierzchni, której skuteczność określono poprzez oznaczenie nasiąkliwości wzmocnionych piaskowców.

2. Wykształcenie litologiczne badanych piaskowców

Badany piaskowiec istebniański ze złoża „Droginia” według klasyfikacji F.J. Pettijohna i in. (1973) ma charakter waki litycznej. Jest szarozółtawy, drobnoziarnisty, umiarkowanie wysortowany (tab. 1), z nielicznymi blaszkami muskowitu i bezładnie rozmieszczonymi, grubszymi (do 1 mm) ziarnami głównie kwarcu, rzadziej zwietrzałych skaleni. Głównym składnikiem jest kwarc (65,5%), natomiast pozostałe składniki szkieletu ziarnowego występują w podrzędnej ilości (tab. 2). Ziarna kwarcu są przeważnie ostrokrawędziste o kształtach wy-

TABELA 1

Skład granulometryczny [% obj.] badanych piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydlowieckiego

TABLE 1

Grain-size composition [vol.%] of the Istebna, Godula and Szydłowiec sandstones studied

Piaskowiec (złoże/ kamieniołom)	Uziarnienie piaskowców [mm]								GSS (φ)	GSO (φ)
	0,031— —0,042	0,042— —0,063	0,063— —0,084	0,084— —0,126	0,126— —0,251	0,251— —0,523	0,523— —1,050	1,050— —2,100		
istebniański (Droginia)	0,0	4,0	14,0	19,3	50,7	8,6	3,4	0,0	2,19	0,94
godulski (Straconka)	1,1	5,7	8,0	19,4	29,2	24,0	9,2	3,4	1,27	1,28
szydlowiecki (Podkowiński)	0,5	1,4	6,1	19,8	70,3	1,9	0,0	0,0	2,60	0,40

dłużonych, rzadziej kulistych (Pl. I, fot. 1). Skalenie są skalcyfikowane i skaolinityzowane, a biotyt schlorotyżowany. Kontakty międzyziarnowe są proste, wklęsło-wypukłe, a sporadycznie punktowe. Spoiwo piaskowców ma charakter porowy, rzadziej kontaktowo-porowy. Złożone jest głównie z mikrokrystalicznego cementu kwarcowego, występującego w udziale 11,5% (tab. 2). W mniejszej ilości (6,0%) występują w spoiwie minerały ilaste: illit, chloryt (Pl. I, fot. 2) oraz kaolinit, a zupełnie nielicznie mikryt węglanowy (0,5%). Litologia tego piaskowa jest opisana między innymi przez M. Kitę-Badak (1963); J. Bromowicza i in. (1976), C. Peszata i M. Buczek-Pułkę (1984), a skład mineralny spoiwa ilastego podają C. Peszat i T. Wieser (1999).

TABELA 2

Skład mineralno-petrograficzny [% obj.] badanych piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydłowieckiego

TABLE 2

Mineral-petrographic composition [vol.%] of the Istebna, Godula and Szydłowiec sandstones studied

Piaskowiec (złoże/ kamieniołom)	Kwarc	Skalenie	Muskowit	Biotyt	Okruchy skał		Glaukonit	Subst. organ.	Spoiwo		
					magm.	metam.			ilaste	krzem.	węglan
istebniański (Droginia)	65,5	7,5	3,0	1,0	3,0	0,5	0,0	1,5	6,0	11,5	0,5
godulski (Straconka)	56,5	3,0	2,0	0,0	5,0	0,0	5,5	0,0	18,5	8,5	1,0
szydłowiecki (Podkowiński)	84,3	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	8,1	0,0

Poddany badaniom piaskowiec godulski ze złoża „Straconka” według klasyfikacji F.J. Pettijohna i in. (1973) jest waką lityczną. Odznacza się szarozielonkową barwą, strukturą drobnoziarnistą i złym wysortowaniem (tab. 1). Makroskopowo widoczne są w nim bezładnie rozrzucone ziarna kwarcu, osiągające wielkość nawet do 2 mm, uwęglona substancja organiczna i nieliczne, drobne blaszki muskowitu. Ziarna szkieletu są przeważnie ostrokrawędziste i powszechnie spękane. Reprezentowane są głównie przez kwarc (56,5%), a podrzędnie przez okrucy skał magmowych (5%) oraz skalenie (3%) i muskowit (2%) (tab. 2). W udziale 5,5% występuje przeważnie niezmienny glaukonit, w którego ziarna kompakcyjnie wciśnięte są twarde składniki szkieletu. Spoiwo piaskowca o charakterze porowym, miejscami podstawowym w udziale 28,0% jest ilasto-krzemionkowe z niewielką domieszką wapnisteo (tab. 2). Dominują w nim chloryty (Pl. I, fot. 3) oraz illit (Pl. I, fot. 4), w mniejszej ilości występuje kwarcowy cement mikrokrystaliczny, a sporadycznie mikryt węglanowy. Omawiany piaskowiec stanowił przedmiot badań między innymi M. Kamińskiego i in. (1968).

Piaskowiec szydłowiecki z kamieniołomu „Podkowiński” według klasyfikacji F.J. Pettijohna i in. (1973) jest arenitem kwarcowym. Charakteryzuje się jednorodnym białym lub białozółtawym zabarwieniem, strukturą drobnoziarnistą o dobrym wysortowaniu ziarn (tab. 1). Budują go prawie wyłącznie ziarna kwarcu (tab. 2), które są półobtoczone i ostrokrawędziste

o kształtach izometrycznych lub nieco wydłużonych. Skalenie, zazwyczaj zwietrzałe, występują podrzędnie w ilości 2,5%.

Stopień upakowania szkieletu ziarnowego jest umiarkowanie dobry. Ubogie spoiwo ilasto-krzemionkowe wypełnia częściowo pory międzyziarnowe oraz występuje na kontaktach ziarn. Rolę spoiwa pełni także krzemionka z obwódek regeneracyjnych (Pl. I, fot. 5), rozwiniętych fragmentarycznie na niektórych ziarnach kwarcu, wykazujących wówczas kontakty zazębiające się. Piaskowiec szydłowiecki opisują między innymi A. Teofilak-Maliszewska (1968) oraz C. Peszat (1973).

3. Wyniki badań piaskowców poddanych wzmocnieniu strukturalnemu

Badania wymienionych piaskowców wykazały, że przy podobieństwie uziarnienia, nieco odmiennym składzie mineralnym i udziale spoiwa oraz zróżnicowanych właściwościach fizyczno-mechanicznych, odznaczają się one różną podatnością na działanie środków wzmocniających.

Piaskowiec istebniański wzmocniony strukturalnie wykazuje zróżnicowane wartości nasiąkliwości wagowej od 0,63 do 3,91% wag. (tab. 3). Największy efekt hydrofobizacji uzyskano stosując preparaty A i C, które spowodowały zmniejszenie nasiąkliwości odpowiednio o 84 i 82% (tab. 3). Badania mikrostrukturalne wykazały, że jest to wywołane krystalizacją w porach dużej ilości drobnych (poniżej 20 μm) krystalitów o kształtach izometrycznych (Pl. I, fot. 6) oraz wydłużonych. Do głębokości 0,20 mm od powierzchni próbki (tab. 3) wypełniają one dość szczelnie przestrzenie międzyziarnowe, jak również oblekają ziarna szkieletu. Poniżej tej strefy impregnacji obserwuje się piaskowiec niezmienny, identyczny jak w próbce kontrolnej. Sposób wykształcenia nowych składników, decydujący o istotnym zmniejszeniu nasiąkliwości skały, nie wpłynął jednak znacząco na jej wzmocnienie. W próbkach tych stwierdzono bowiem najmniejsze (32—42%) obniżenie ścieralności względem próbki kontrolnej (tab. 3). W pozostałych próbkach (I-3 i I-5) zastosowane środki wpłynęły na nieznaczną lub umiarkowaną hydrofobizację, która wyrażona jest spadkiem nasiąkliwości o 2 i 43% (tab. 3). Zdecydowały one jednak o wyraźniejszym wzmocnieniu, wyrażającym się ścieralnością 0,20 cm i 0,21 cm, co stanowi odpowiednio 47 i 45% ścieralności próbki porównawczej. Wielkość omawianych parametrów związana jest z odmiennym niż w próbkach I-2 i I-4 wykształceniem składników impregnatów. Tworzą one cienkie polewy na ziarnach, a w próbce I-3 dodatkowo wypełniają część porów. Wspomniane formy obserwowane są do głębokości 0,50 mm od powierzchni.

Piaskowiec godulski, podobnie jak omówiony wcześniej piaskowiec istebniański, wykazuje różnorodną podatność na oddziaływanie środków wzmocniających. Zastosowanie preparatów A i C spowodowało spadek jego nasiąkliwości do wartości 0,61—0,68%. W stosunku do próbki kontrolnej uległa ona zmniejszeniu o 81—82%, w czym piaskowiec godulski wykazuje podobieństwo do istebniańskiego. Wynika ono z identycznego wykształcenia mikrostrukturalnego wykrywalnych w nich składników. Wykazują one formy izometryczne i wydłużone, występując na powierzchni ziarn oraz szczelnie wypełniając przestrzeń porową (Pl. II, fot. 1) do głębokości 0,10 mm. Ma to wpływ na obniżenie ścieralności próbek w zakresie 10—35%

(tab. 3). W piaskowcu godulskim hydrofobizowanym preparatami B i D efekt przeprowadzonego zabiegu jest najniższy, co wyraża się zmniejszeniem nasiąkliwości tylko o 2—6% (tab. 3), mimo iż głębokość ich penetracji dochodzi nawet do 0,8 mm. W wyniku kondensacji substancja wzmacniająca tworzy polewy wyłącznie na ziarnach kwarcu bez zapełniania przestrzeni porowej (Pl. II, fot. 2, Pl. II, fot. 3, 4). Wykazane obniżenie ścieralności piaskowców (10—25%) w próbkach G-3 i G-5 w stosunku do stwierdzonego w piaskowcu istebniańskim (I-3 i I-5) może wynikać z mniejszego (56,5%) w nich udziału ziarn kwarcu (tab. 2).

Piaskowiec szydłowiecki poddany wzmacnianiu czterema preparatami wykazuje, podobnie jak w omawianych uprzednio skałach, największe obniżenie nasiąkliwości względem próbki kontrolnej po zastosowaniu środków C i A o 81 i 93% (tab. 3), natomiast najmniejsze po użyciu

TABELA 3

Właściwości fizyczno-mechaniczne badanych piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydłowieckiego

TABELA 3

Physico-mechanical properties of the Istebna, Godula and Szydłowiec sandstones studied

Piaskowiec (złoże/ kamieniołom)	Numer próbki	Preparat wzmac- niający	Głębokość impregnacji [mm]	Nasiąkliwość wagowa		Nasiąkliwość objętościowa [% obj.]	Ścieralność	
				[% wag.]	procentowe obniżenie względem próbki kontrolnej		[cm]	procentowe obniżenie względem próbki kontrolnej
istebniański (Droginia)	I-1	*	—	4,01	—	9,02	0,38	—
	I-2	A	0,2	0,63	84	1,45	0,26	32
	I-3	B	0,15	2,22	43	5,1	0,21	45
	I-4	C	0,1	0,7	82	1,6	0,22	42
	I-5	D	0,5	3,91	2	8,84	0,2	47
godulski (Straconka)	G-1	*	—	3,56	—	8,27	0,2	—
	G-2	A	0,1	0,61	82	1,42	0,18	10
	G-3	B	0,8	3,5	2	8,08	0,15	25
	G-4	C	0,1	0,68	81	1,59	0,13	35
	G-5	D	0,15	3,37	6	7,8	0,18	10
szydłowiecki (Podkowiński)	S-1	*	—	7,39	—	15,18	1,07	—
	S-2	A	0,7	0,54	93	1,11	0,68	36
	S-3	B	1,5	6,63	11	13,46	0,26	76
	S-4	C	0,25	1,41	81	2,88	1,06	1
	S-5	D	0,2	6,18	17	12,66	0,42	61

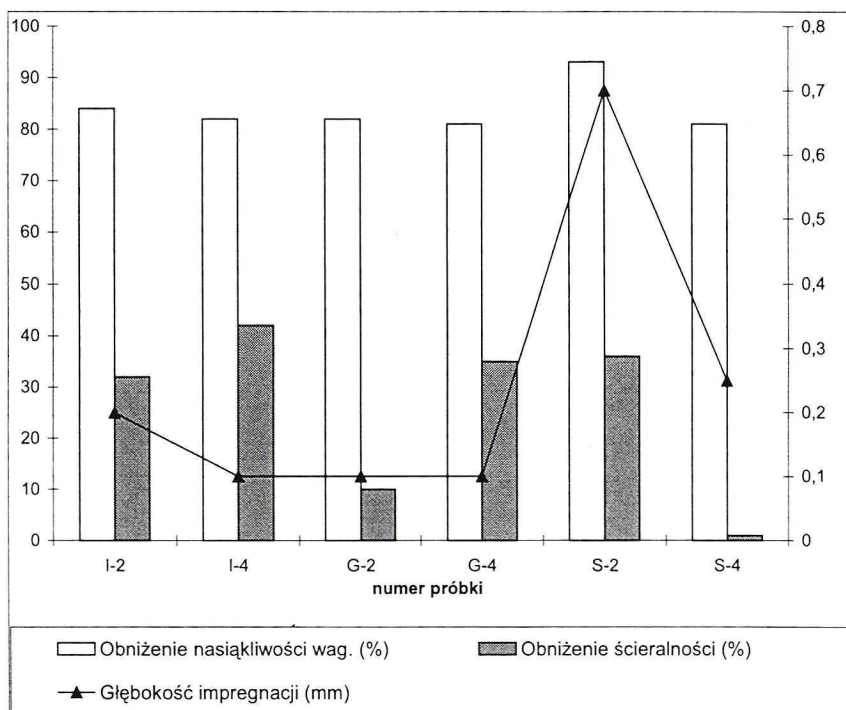
* Kontrolna próbka piaskowca nie poddanej impregnacji.

preparatów B i D (11% i 17%). Wykryształizowane składniki są wykształcone analogicznie do opisanych w piaskowcach istebniańskim i godulskim. W próbkach S-2 i S-4 na powierzchni ziarn i w przestrzeni porowej (Pl. II, fot. 5, 6) obecne są gruzełkowate skupienia izometrycznych i wydłużonych krystalitów. Piaskowiec pokryty preparatami B i D charakteryzuje się obecnością substancji tworzącej opisane wcześniej polewy na ziarnach kwarcu (Pl. III, fot. 1). Ponadto występuje ona na kontaktach ziarn, a sporadycznie wypełnia części porów (Pl. III, fot. 2, 3, 4). Piaskowiec szydłowiecki w stosunku do istebniańskiego i godulskiego wykazuje największe obniżenie ścieralności w przedziale od 0,26 do 0,42 cm. W odniesieniu do próbki kontrolnej parametr ten uległ zmniejszeniu w zakresie 61—76% (tab. 3), co można wiązać z największym (84,3%) udziałem ziarn kwarcu w tym piaskowcu (tab. 2). Utrzymana jednocześnie duża nasiąkliwość w granicach 6,18—6,63% (tab. 3) wynikać może z kontaktowego charakteru wypełnienia piaskowca preparatem wzmacniającym. Głębokość strefy impregnacji jest bardzo zróżnicowana i waha się w poszczególnych próbkach od 0,2 do 1,5 mm (tab. 3).

4. Wpływ wykształcenia piaskowców na oddziaływanie różnych środków wzmacniających

Wykonane badania podatności piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydłowieckiego, na uzyskanie w nich efektu hydrofobizacji i wzmocnienia wykazały wyraźne zróżnicowanie ich nasiąkliwości wagowej i ścieralności oraz głębokości penetracji zastosowanych środków. Ponadto zaobserwowano pewne zarysowujące się prawidłowości dotyczące stopnia i charakteru wypełnienia przestrzeni porowej piaskowców, w zależności od zastosowanego preparatu do wzmacniania. Stwierdzono, że bez względu na wykształcenie strukturalne piaskowców oraz ich skład mineralny, użycie impregnatów oznaczonych jako A i C doprowadziło do utworzenia się drobnych osobników wypełniających przestrzeń porową oraz oblekających ziarna. Zastosowanie natomiast preparatów B i D spowodowało utworzenie się cienkich polew na ziarnach ich szkieletu, rzadziej wypełnienie przestrzeni porowej. Z tego względu analizę skuteczności wzmocnienia piaskowców przeprowadzono w tych dwóch grupach.

Użycie środków A i C wpłynęło we wszystkich piaskowcach na duże obniżenie nasiąkliwości wagowej o 81—93% (rys. 1) w stosunku do próbek nie poddanych wzmocnieniu. Średnio wartości najwyższe stwierdzono w piaskowcu szydłowieckim (próbki S-2, S-4), który wykazuje najwyższą ilość pustych porów, a występujące między nimi zróżnicowanie wynika z konsystencji zastosowanych preparatów. W piaskowcu tym również obserwowano największą grubość (0,7 mm) strefy zaimpregnowanej w stosunku do pozostałych próbek, gdzie waha się ona od 0,10 do 0,25 mm. Stwierdzono, że głębokość impregnacji zależna jest od wielkości uziarnienia, wzrastając wraz ze zwiększaniem GSS (współczynnik korelacji $r = 0,67$) oraz od stopnia jego wysortowania ($r = -0,75$). Wykazano ponadto, że skuteczność hydrofobizacji wyrażona spadkiem nasiąkliwości zależy od głębokości penetracji środków, co obrazuje wysoka wartość 0,94 współczynnika korelacji pomiędzy tymi parametrami. Jednocześnie należy stwierdzić, że użyte preparaty w większym stopniu doprowadziły do hydrofobizacji piaskowców niż

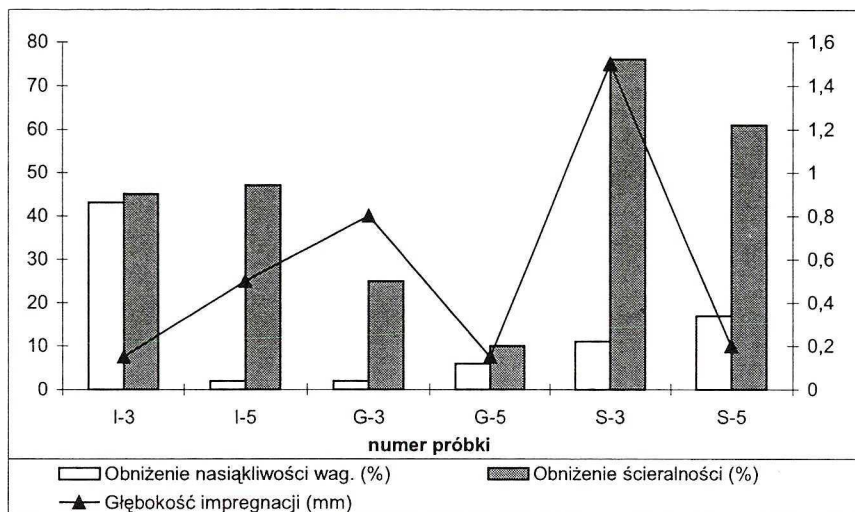


Rys. 1. Wartości procentowego obniżenia nasiąkliwości wagowej i ścieralności oraz głębokość impregnacji preparatami A i C w piaskowcach: istebniańskim (I-2, I-4), godulskim (G-2, G-4) i szydlowieckim (S-2, S-4)

Fig. 1. Lowering [%] of water absorbability, grindability and the depth of impregnation as the effects of strengthening of the Istebna (I-2, I-4), Godula (G-2, G-4) and Szydłowiec (S-2, S-4) sandstones with the A and C compounds

do ich strukturalnego wzmocnienia, którego przejawem są stwierdzone stosunkowo niskie wartości obniżenia ścieralności (rys. 1). Wynikają one głównie ze wspomnianego sposobu krystalizacji składników impregnatów, które wypełniają pory, ale nie wiążą ziarn szkieletu. Wykazanego zróżnicowania tych wartości w zakresie od 1 do 42% nie udało się natomiast powiązać ani ze składem mineralnym piaskowców, ani też z ich wykształceniem mikrostrukturalnym.

Piaskowce poddane działaniu preparatów B i D uległy większemu wzmocnieniu niż piaskowce opisane wyżej. Jednocześnie stwierdzono, że w grupie tej efekt wzmocnienia (obniżenie ścieralności o 10—76%) jest większy niż hydrofobizacja, którą wyraża spadek nasiąkliwości wagowej w zakresie od 2 do 43% (rys. 2). Spowodowane jest to tworzeniem się cienkich pól na ziarnach oraz na ich kontaktach, co w sposób wyraźny wpływa na wzmocnienie tych piaskowców, nie ograniczając zbytnio porowatości. Może to natomiast mieć miejsce, gdy narastające polewy zapełnią częściowo duże pory lub całkowicie wypełnią pory małe. Te ostatnie tak szczelnie zabudowane stwierdzono w obrębie piaskowców wszystkich typów, zróżnicowanych pomiędzy sobą w zakresie nasiąkliwości. Szczególnie



Rys. 2. Wartości procentowego obniżenia nasiąkliwości wagowej i ścieralności oraz głębokość impregnacji preparatami B i D w piaskowcach: istebniańskim (I-3, I-5), godulskim (G-3, G-5) i szydłowieckim (S-3, S-5)

Fig. 2. Lowering [%] of water absorbability, grindability and the depth of impregnation as the effects of strengthening in the Istebna (I-3, I-5), Godula (G-3, G-5) and Szydłowiec (S-3, S-5) sandstones with the B and D compounds

widoczne jest to w piaskowcu istebniańskim (próbka I-3), który wykazuje największy spadek nasiąkliwości o 43% (rys. 2). We wszystkich piaskowcach zaobserwowano, że w przypadku występowania w nich dużej ilości małych porów głębokość penetracji środka wzmacniającego jest niewielka, a wzrasta przy przewadze porów większych. Jest ona również zależna od uziarnienia wyrażonego średnią średnicą ziarna ($r = 0,24$) oraz stopnia wysortowania ($r = -0,35$). Wykazane zróżnicowanie grubości strefy impregnacji ma wyraźny wpływ na stopień wzmocnienia piaskowca, wyrażony obniżeniem jego ścieralności, co przedstawia współczynnik korelacji równy 0,52.

Dla oceny skuteczności impregnacji w poszczególnych typach piaskowców dokonano uśrednienia wyników nasiąkliwości i ścieralności dla próbek poddanych wzmocnieniu wszystkimi środkami. Odniesiono je do wartości tych parametrów w próbkach kontrolnych. Stwierdzono, że największe średnie procentowe obniżenie ścieralności (80%) względem próbki kontrolnej ma miejsce w piaskowcu godulskim, natomiast w piaskowcu szydłowieckim wartość ta jest najmniejsza (tab. 4). Można to wiązać z zawartością spoiwa ilastego i mikrytowego węglanowego, w którym pory pomiędzy tymi składnikami zostały wypełnione wykrystalizowaną substancją wzmacniającą. W efekcie tego procesu w pierwszym z wymienionych piaskowców, gdzie udział tych składników jest największy i wynosi 19,5% (tab. 2), doszło do najsilniejszego związania struktury skały (tab. 4). W piaskowcu szydłowieckim o małej zawartości spoiwa ilastego (5,1%), powstające składniki wypełniły część porów, nie wywołując zauważalnego wzmocnienia. Jedyne utworzone polewy na ziarnach detrytycznych doprowadziły do wyraźnego wzmocnienia tej skały (tab. 4).

TABELA 4

Srednie wartości właściwości fizyczno-mechanicznych badanych piaskowców istebniańskich, godulskich i szydlowieckich przed i po impregnacji

TABLE 4

Mean values of the physico-mechanical properties of the Istebna, Godula and Szydłowiec sandstones studied prior to and after structural impregnation

Piaskowiec (złoże/ kamieniołom)	Nasiąkliwość wagowa próbki kontrolnej [% wag.]	Ścieralność próbki kontrolnej [cm]	Nasiąkliwość wagowa		Ścieralność	
			% wag.	procentowe obniżenie względem próbki kontrolnej	cm	procentowe obniżenie względem próbki kontrolnej
istebniański (Droginia)	4,01	0,38	1,87	46,6	0,22	57,9
godulski (Straconka)	3,56	0,20	2,04	57,3	0,16	80,0
szydlowiecki (Podkowiński)	7,39	1,07	3,69	49,9	0,61	57,0

5. Uwagi końcowe

W pracy podjęto próbę wykazania wpływu wykształcenia wybranych piaskowców: istebniańskiego, godulskiego i szydlowieckiego na skuteczność przeprowadzanego w nich wzmocnienia różnego rodzaju preparatami. Założono, że o jakości tego zabiegu świadczyć mogą: spadek nasiąkliwości spowodowany hydrofobizacją, obniżenie ścieralności względem próbki kontrolnej wywołane wzmocnieniem strukturalnym oraz grubość strefy zaimpregnowanej. Wykonane badania wykazały, że wszystkie piaskowce uległy wzmocnieniu i hydrofobizacji, ale w różnym stopniu. W zdecydowanej większości próbek piaskowców ich ścieralność jest mniejsza przynajmniej o 10%, a maksymalnie o 76% w stosunku do próbek kontrolnych. Głębokość penetracji zastosowanych środków wynosi od 0,1 do 1,5 mm. Według deklaracji producentów takie wartości tych parametrów zapewniają skuteczność przeprowadzonego wzmocnienia. Natomiast spadek nasiąkliwości piaskowców w zależności od zastosowanych preparatów B i D oraz A i C wynosi odpowiednio 2—43% i 81—93%, co świadczy, że część tych środków ma wysokie właściwości hydrofobowe.

Stwierdzono, że bez względu na wykształcenie strukturalne piaskowców oraz ich skład mineralny, użycie impregnatów oznaczonych jako A i C doprowadziło do powstania drobnych krystalitów wypełniających przestrzeń porową oraz pokrywających ziarna. Zastosowanie środków B i D spowodowało natomiast utworzenie cienkich pól na ziarnach oraz na ich kontaktach, co w sposób wyraźny wpływa na wzmocnienie tych piaskowców, jednocześnie nie ograniczając zbytnio porowatości.

Skuteczność impregnacji w poszczególnych typach piaskowców oceniono poprzez porównanie średnich wartości nasiąkliwości i ścieralności dla próbek poddanych impregnacji do wartości tych parametrów w próbkach kontrolnych. Na tej podstawie wykazano, że największy efekt wzmocnienia uzyskano dla piaskowca godulskiego, gdzie najliczniej występujące spoiwo ilaste i mikrytowe węglanowe zostało zaimpregnowane i uszczelnione wykrystalizowaną substancją wzmacniającą. Najmniejszy wpływ impregnacji stwierdzono w piaskowcu szydłowieckim o małej zawartości spoiwa ilastego, w którym wzmocnienie nastąpiło poprzez częściowe związanie ziarn kwarcu.

Uzyskane wyniki badań dla piaskowców pochodzących z kamieniołomów: „Droginia”, „Straconka” i „Podkowiński”, pozwalają wnioskować o skuteczności zabiegu wzmacniania piaskowców z obiektów zabytkowych, które zostały osłabione przez usunięcie spoiwa. Nasuwa się wniosek, że nie wszystkie preparaty wzmacniające są w takich przypadkach równie skuteczne. Niektóre z nich doprowadzają tylko do hydrofobizacji, bez wyraźnego wzmocnienia, a inne zapewniają wzmocnienie wymagając jednak późniejszej hydrofobizacji piaskowca. W takiej sytuacji spośród środków zastosowanych w badaniach, najlepszy efekt można uzyskać stosując impregnaty oznaczone B i D. Stwierdzono ponadto, że użyty środek do wzmacniania betonu może być także stosowany do skał.

Praca zrealizowana została w ramach prac statutowych Zakładu Złóż Surowców Skalnych AGH (nr 11.11.140.61), finansowanych przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

- Bolewski A., 1954 — Z dziejów eksploatacji karpaccich piaskowców ciosowych. *Przegląd Geologiczny* nr 5, 182—183.
- Bromowicz J., Gucik S., Magiera J., Moroz-Kopczyńska M., Nowak T.W., Peszat C., 1976 — Piaskowce karpaccie, ich znaczenie surowcowe i perspektywy wykorzystania. *Zeszyty Nauk. AGH, Geologia* 2 (2), 3—95.
- Kamiński M., Peszat C., Rutkowski J., Soczylas-Ciszewska K., 1968 — O wykształceniu i własnościach technicznych piaskowców godulskich. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia* 12, 3—80.
- Kita-Badak M., 1963 — O możliwości wykorzystania piaskowców warstw istebniańskich z okolic Dobczyc. *Kwartalnik Geologiczny* 7, 374—383.
- Peszat C., 1973 — Własności techniczne piaskowców Gór Świętokrzyskich. *Zeszyty Nauk. AGH, Geologia* 18, 1—59.
- Peszat C., Buczek-Pułka M., 1984 — Zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych budowlanych piaskowców istebniańskich obszaru Karpat. *Zeszyty Nauk. AGH, Geologia* 10 (1), 5—34.
- Peszat C., Wieser T., 1999 — Mineral composition of matrix in thick-bedded Istebna Sandstones (the Polish Flysch Carpathians). *Mineral. Polon.* 30 (1), 73—84.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R., 1973 — *Sand and sandstone*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Teofilak-Maliszewska A., 1968 — Petrografia osadów liasu w północnym obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich. *Biul. IG* 216, 107—186.
- Urban J., Gągol J., 1994 — Kamieniołomy piaskowców w dawnych ośrodkach górnictwa kamiennego północnej części regionu świętokrzyskiego jako zabytki techniki i przyrody. *Przegl. Geol.* 42 (3), 193—200.

PLANSZA I

Fot. 1. Piaskowiec istebniański (próbka I-1) nie poddany zabiegowi wzmacniania strukturalnego, stanowiący próbkę kontrolną. Ziarna kwarcu (Q) są przeważnie ostrokrawędziste o kształtach wydłużonych, rzadziej kulistych. Część porów (p) jest niewypełniona. Obraz SEM

Phot. 1. Istebna sandstone (sample I-1) without structural strengthening (a reference sample). Quartz grains (Q) are usually angular and elongated, less frequently spherical. Some of the pores (p) remain unfilled. SEM image

Fot. 2. Piaskowiec istebniański (próbka I-1) nie poddany zabiegowi wzmacniania strukturalnego, stanowiący próbkę kontrolną. W przestrzeni porowej występują składniki ilaste spoiwa: illit (I) oraz chloryty (Ch). Obraz SEM

Phot. 2. Istebna sandstone (sample I-1) without structural strengthening (a reference sample) In the pore space clay components of the cement: illite (I) and chlorites (Ch) can be seen. SEM image

Fot. 3. Piaskowiec godulski (próbka G-1) nie poddany zabiegowi wzmacniania strukturalnego, stanowiący próbkę kontrolną. Płytki chlorytów (Ch) dość szczelnie wypełniają przestrzeń pomiędzy ziarnami kwarcu (Q). Obraz SEM

Phot. 3. Godula sandstone (sample G-1) without structural strengthening (a reference sample). Chlorite platelets (Ch) rather tightly fill the spaces among quartz grains (Q). SEM image

Fot. 4. Piaskowiec godulski (próbka G-1) nie poddany zabiegowi wzmacniania strukturalnego, stanowiący próbkę kontrolną. Błazki illitu (I) zapelniające przestrzeń porową piaskowca. Obraz SEM

Phot. 4. Godula sandstone (sample G-1) without structural strengthening (a reference sample). Illite flakes (I) fill the pore space of the rock. SEM image

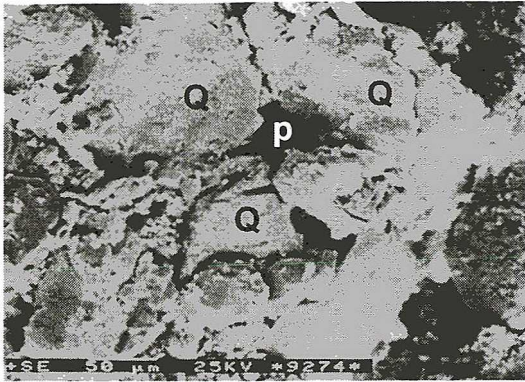
Fot. 5. Piaskowiec szydlowiecki (próbka S-1) nie poddany zabiegowi wzmacniania strukturalnego, stanowiący próbkę kontrolną. Piaskowiec silnie porowaty. Spoiwo rozwinięte w formie fragmentarycznych obwódek regeneracyjnych (Qr) obecne jest tylko na kontaktach ziarn. Obraz SEM

Phot. 5. Szydlowiec sandstone (sample S-1) without structural strengthening (a reference sample). Strongly porous rock with its cement developed as a fragmentary quartz overgrowths (Qr) present only at the grain contacts. SEM image

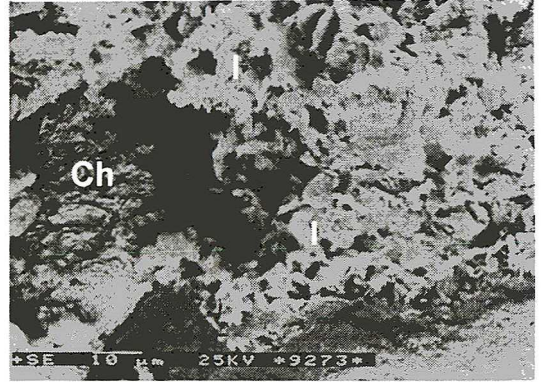
Fot. 6. Piaskowiec istebniański (próbka I-2) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Przestrzeń porowa zapelniona przez drobne (poniżej 20 μm), izometryczne krystalicity substancji wzmacniającej (sw). Obraz SEM

Phot. 6. Istebna sandstone (sample I-2) after structural strengthening. Its pore space is filled with fine (below 20 μm), isometric crystallites of a strengthening substance (sw). SEM image

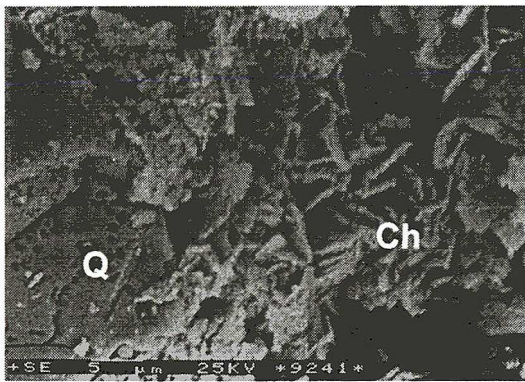
PLANSZA I



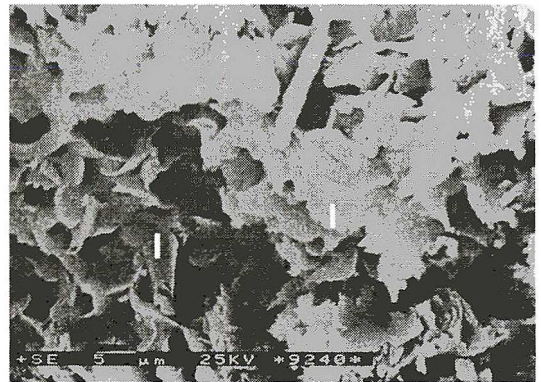
Fot. 1.



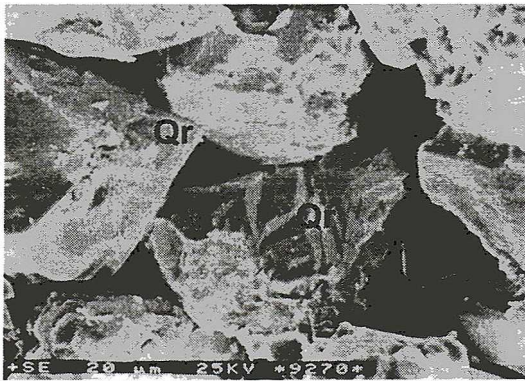
Fot. 2.



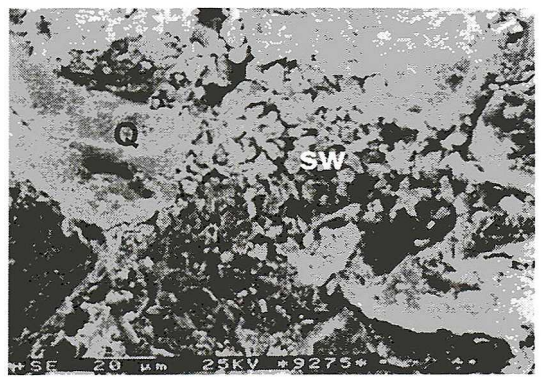
Fot. 3.



Fot. 4.



Fot. 5.



Fot. 6.

PLANSZA II

Fot. 1. Piaskowiec godulski (próbka G-4) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Powstałe krystality (sw) występują na powierzchni ziarn kwarcu (Q) oraz szczelnie wypełniają przestrzeń porową, natomiast nie pokrywają one węglanów (C) spoiwa. Obraz SEM

Phot. 1. Godula sandstone (sample G-4) after structural strengthening. Neofomed crystal-like grains of the strengthening substance (sw) cover surfaces of quartz grains (Q) and tightly fill pore space, but do not cover the carbonate grains (C) of the cement. SEM image

Fot. 2. Piaskowiec godulski (próbka G-3) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. W wyniku kondensacji utworzyła się polewa (sw) wyłącznie na ziarnach kwarcu (Q) bez zapełniania przestrzeni porowej. Obraz SEM

Phot. 2. Godula sandstone (sample G-3) after structural strengthening. Neofomed mass of the strengthening substance (sw) polymerized on quartz grains (Q) but left part of pore space unfilled. SEM image

Fot. 3. Piaskowiec godulski (próbka G-3) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Polewa utworzona z substancji wzmacniającej (sw) pokrywa ziarno z widocznymi zatokami korozyjnymi. Obraz SEM

Phot. 3. Godula sandstone (sample G-3) after structural strengthening. Neofomed mass of a strengthening substance (sw) cover an embayed quartz grain. SEM image

Fot. 4. Piaskowiec godulski (próbka G-5) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Część przestrzeni porowej (p) zapełniona jest przez środek wzmacniający (sw). Obraz SEM

Phot. 4. Godula sandstone (sample G-5) after structural strengthening. Part of pore space (p) is filled with a neofomed strengthening substance (sw). SEM image

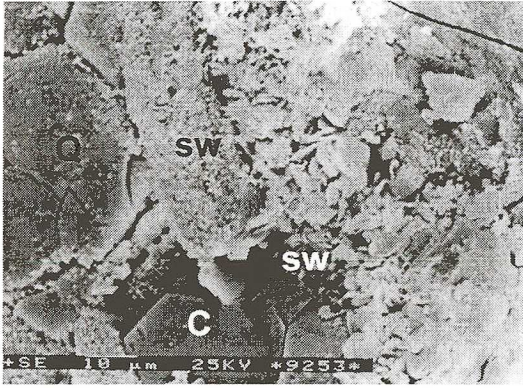
Fot. 5. Piaskowiec szydlowiecki (próbka S-4) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Impregnat wykrystalizowany w formie drobnych gruzełek (sw) budujących agregaty wypełniające częściowo przestrzeń porową pomiędzy ziarnami kwarcu (Q). Obraz SEM

Phot. 5. Szydlowiec sandstone (sample S-4) after structural strengthening. Impregnating substance polymerized as fine lumps (sw) that aggregate and partly fill pore space among quartz grains (Q). SEM image

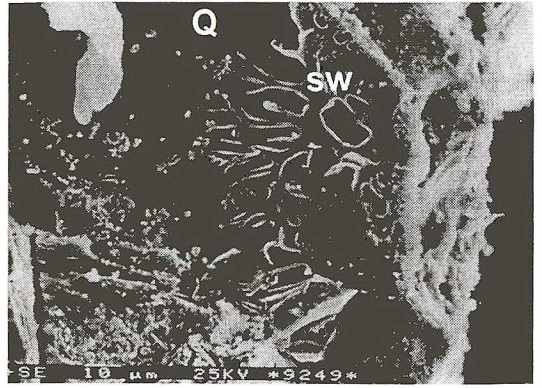
Fot. 6. Piaskowiec szydlowiecki (próbka S-2) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Niewielka część przestrzeni porowej jest zabudowana przez środek wzmacniający (sw), który obecny jest też na powierzchni ziarn kwarcu (Q). Obraz SEM

Phot. 6. Szydlowiec sandstone (sample S-2) after structural strengthening. Small part of pore space is filled with a strengthening substance (sw) that also covers the surfaces of quartz grains (Q). SEM image

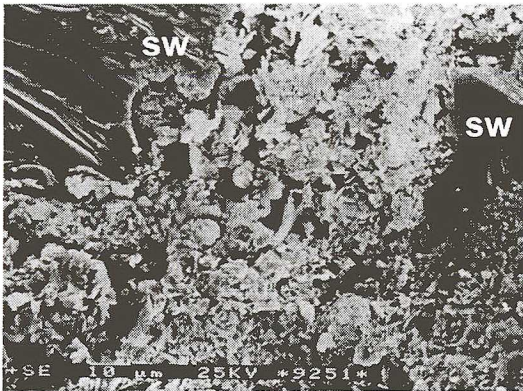
PLANSZA II



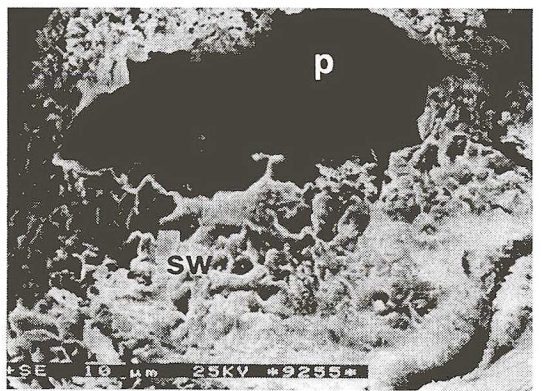
Fot. 1.



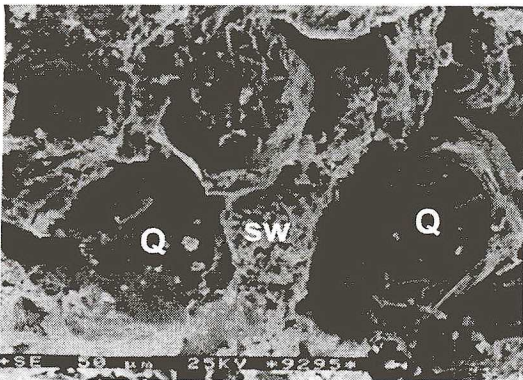
Fot. 2.



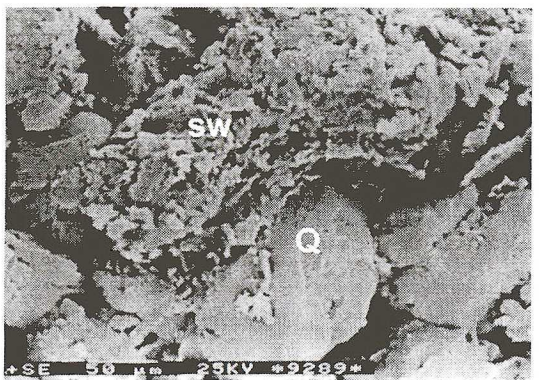
Fot. 3.



Fot. 4.



Fot. 5.



Fot. 6.

PLANSZA III

Fot. 1. Piaskowiec szydłowiecki (próbka S-5) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Ziarna kwarcu (Q) pokryte polewami substancji wzmacniającej (sw). Obraz SEM

Phot. 1. Szydłowiec sandstone (sample S-5) after structural strengthening. Quartz grains (Q) with neoformed mass of a strengthening substance (sw). SEM image

Fot. 2. Piaskowiec szydłowiecki (próbka S-5) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Impregnat (sw) występuje na ziarnach w postaci polew i zapełnia dużą część przestrzeni porowej. Obraz SEM

Phot. 2. Szydłowiec sandstone (sample S-5) after structural strengthening. Neoformed mass of a strengthening substance (sw) cover quartz grains grains and fill substantial part of pore space. SEM image

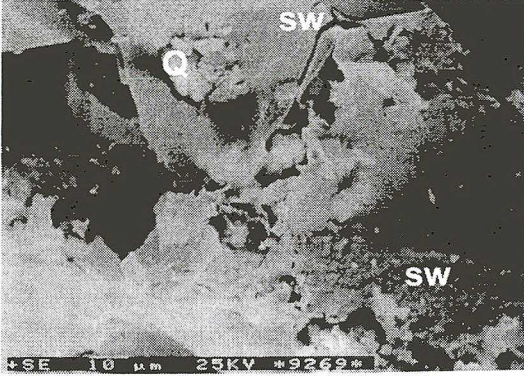
Fot. 3. Piaskowiec szydłowiecki (próbka S-3) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Spękana polewa (sw) obleka ziarna kwarcu (Q) wiążąc je na kontaktach. Impregnat wypełnia także przestrzeń porową. Obraz SEM

Phot. 3. Szydłowiec sandstone (sample S-3) after structural strengthening. Cracked mass of a strengthening substance (sw) is developed on quartz grains (Q) and partly fills pore space at the grain contacts. SEM image

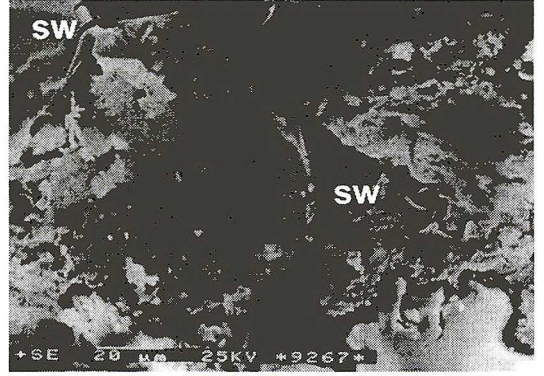
Fot. 4. Piaskowiec szydłowiecki (próbka S-3) poddany wzmocnieniu strukturalnemu. Substancja wzmacniająca (sw) wykryta w przestrzeni porowej silnie wiąże ziarna kwarcu (Q). Obraz SEM.

Phot. 4. Szydłowiec sandstone (sample S-3) after structural strengthening. Mass of a strengthening substance (sw) polymerized in pore space and strongly bound quartz grains (Q). SEM image

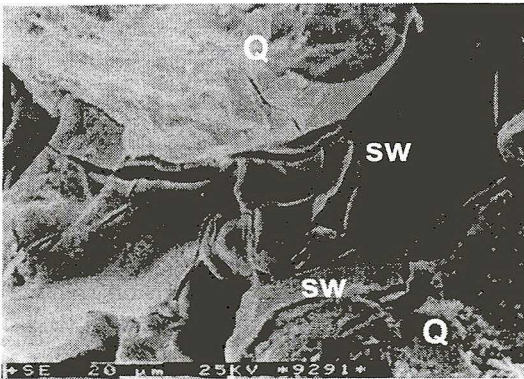
PLANSZA III



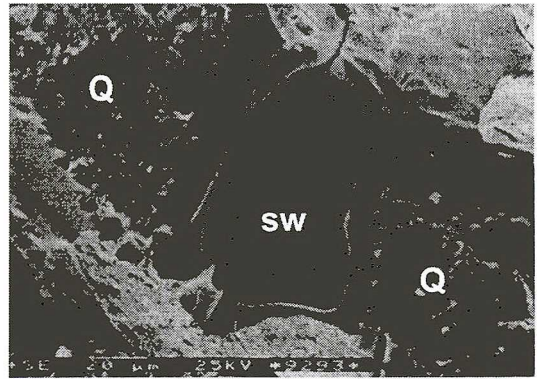
Fot. 1.



Fot. 2.



Fot. 3.



Fot. 4.

SUSCEPTIBILITY OF SELECTED SANDSTONES TO STRUCTURAL STRENGTHENING**Key words**

Conservation of the sandstone, structural strengthening

Abstract

The authors investigated microstructural development and selected physico-mechanical properties of the sandstones that were treated with structural strengthening chemicals. The method involved impregnation of the pore space of the rocks with various organic compounds that after polymerization at least partly cemented the grain framework. To obtain proper strengthening of renovated, damaged parts of the rock, the substance after polymerization should attain physico-mechanical properties approximating those in unaltered parts of the rock. The investigations were carried on the samples collected from selected outcrops of the Istebna sandstone („Droginia” deposit), the Godula sandstone („Straconka” deposit) and the Szydłowiec sandstone („Podkowiński” quarry). The paper presents dependences between diversified lithologies of the natural sandstones and the changes of their physico-mechanical properties resulting from application of various strengthening substances. The changes resulting from impregnation in unaltered sandstone samples allow to predict efficiency of the same strengthening processes that can be applied to various types of damaged sandstones in historic buildings.