

## Petrograficzne uwarunkowania zmienności mechanicznych właściwości niejednorodnego strukturalnie marmuru kalcytowego

Marek Rembiś<sup>1</sup>, Maria Kośla<sup>1</sup>



M. Rembiś

M. Kośla

**Petrographic constraints on the mechanical properties of a structurally heterogenous calcite marble.** *Prz. Geol.*, 70: 116–125; doi: 10.7306/2022.6

*Abstract.* Due to its exceptional ornamental properties, the marble Fior di Pesco Carnico (FDP marble) is a common decorative stone applied to external and internal building elevations. The rock is characterized by a considerable structural and textural variability; however, this feature pertains only to a minor degree to its directional arrangement of anisotropy planes (i.e. lamination) being usually dependent on the non-uniform, spatial distribution of rock mineral components or some textural elements, mainly veins. As a result, the utilitarian properties of the FDP marble varies depending on the rock zone. Petrographic AGA (Adjacent Grain Analysis) investigations were carried out on samples representing various fragments of a marble slab and essential mechanical parameters of the rock were determined. It has been established

that the FDP marble is deformable as a result of temperature changes (bowing) and that this feature can be explained to a significant degree by the type of contacts between calcite blasts (AGA = 6). Other highly variable marble properties include the flexural strength under the concentrated load and the breaking load at dowel hole in different places of a marble plate. It has also been shown that applying to computational project works lower values of the expected mechanical rock parameters instead of their mean values has a sensible justification, as to a large extent it secures a higher exploitation safety of the marble to be used within a building object.

**Keywords:** marble Fior di Pesco Carnico, Adjacent Grain Analysis, bowing

We współczesnym budownictwie często sięga się po rozwiązania projektowe, zgodnie z którymi na zewnętrznych elewacjach budowli stosuje się płyty kamienne o znacznych rozmiarach, w wyrazisty sposób eksponujące ich walory dekoracyjne. Powszechnie wiadomo, że przydatnym do tego celu materiałem są m.in. marmury. Stanowią one grupę skał o wyraźnym zróżnicowaniu litologicznym, charakteryzują się dużą zmiennością składu mineralnego, barwy oraz cech strukturalnych i teksturalnych. Cechy te w połączeniu ze zdolnością przyjmowania faktury polerowanej sprawiają, że marmury mają wyjątkowe walory ozdobne i są uznanym oraz powszechnie stosowanym w budownictwie materiałem wykończeniowym i dekoracyjnym (Bromowicz i in., 2005). Zmienność ich wykształcenia wynika ze złożonej historii geologicznej, na którą składają się warunki depozycji osadu oraz jego diagenetyczne przemiany i późniejsze procesy metamorficzne. Decyduje ona nie tylko o znacznej różnorodności wizualnej tego kamienia, ale niejednokrotnie wpływa także na dużą zmienność, a nawet anizotropię jego parametrów technicznych, zwłaszcza w odmianach marmurów o uporządkowanym (kierunkowym) rozmieszczeniu składników mineralnych (Cardani, Meda, 1999; Kourkoulis i in., 1999; Wang i in., 2020).

Projektanci podejmują starania, aby opracowane projekty, uwzględniające warunki użytkowania obiektu, były oparte na trwałych rozwiązaniach zarówno w zakresie sposobu montażu, jak i doboru kamienia o odpowiedniej jakości. W tym celu wykorzystują wyniki badań różnych parametrów kamienia, głównie wytrzymałości na zginanie i ściskanie oraz mrozoodporności. Wobec licznych doniesień o deformacjach płyt marmurowych zachodzących w wielu budowlach wzniesionych w różnych strefach klimatycznych (Schouenborg i in., 2007) coraz częściej poddawana jest ocenie także podatność na odkształcenie wy-

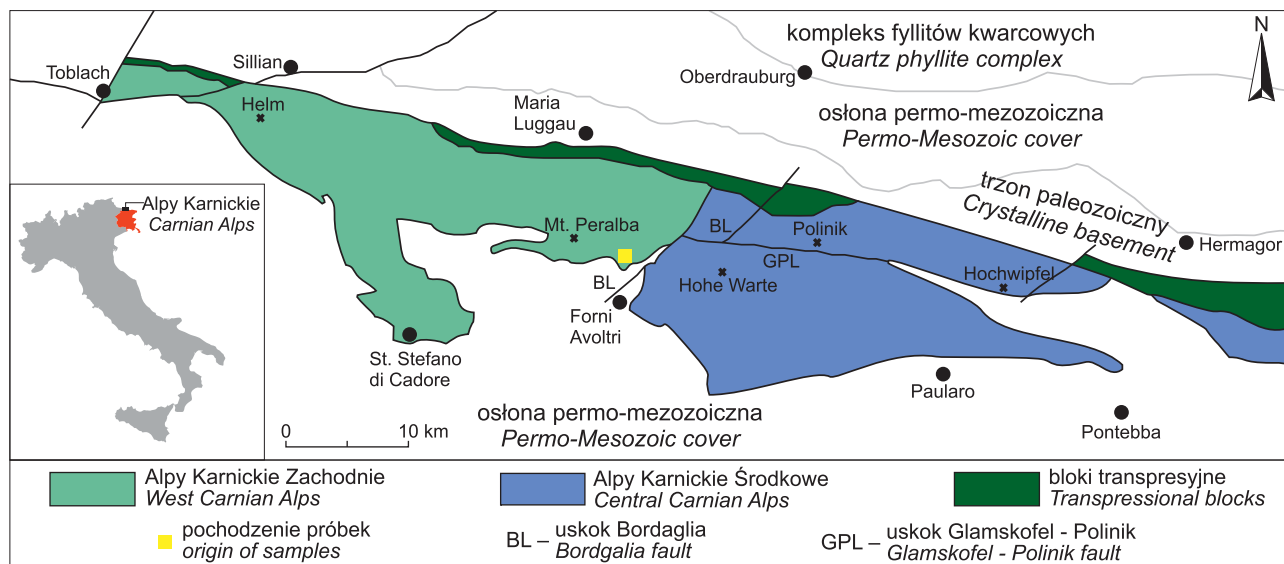
wołana cyklicznymi zmianami temperatury w warunkach zawilgocenia. Jako kryterium identyfikacji zmienności cech użytkowych marmurów przyjmuje się zwykle kierunek ułożenia płaszczyzn anizotropii (uwarstwienia, laminacji), co wynika także z zapisów norm europejskich dotyczących metod badań właściwości mechanicznych kamienia naturalnego. Wskazany jest w nich sposób wycięcia próbek w stosunku do położenia tych płaszczyzn oraz odpowiednie ich ułożenie względem kierunku działającego obciążenia. W praktyce badawczej zalecenia te są powszechnie stosowane, natomiast znacznie rzadziej zwraca się uwagę na zjawisko nierównomiernego rozmieszczenia składników mineralnych lub poszczególnych elementów strukturalnych (np. żył, lamin) i jego wpływ na strefową zmienność cech użytkowych marmuru. W ocenie autorów jest to ważne zagadnienie i z tego względu podjęte zostały badania, których wyniki są prezentowane w niniejszej pracy. Jako przedmiot badań wybrano jedną z odmian marmuru kalcytowego o komercyjnej nazwie *Fior di Pesco Carnico*. Charakteryzuje się ona dużą zmiennością barwy i nierównomiernym rozmieszczeniem różnych elementów strukturalnych. Ze względu na swoje wyjątkowe walory dekoracyjne marmur ten jest powszechnie stosowany w budownictwie, zwłaszcza jako materiał okładzin elewacji, także zewnętrznych. Na próbkach pobranych z różnych części tej samej płyty marmuru zostały wykonane badania parametrów istotnych z punktu widzenia odporności płyty okładzinowej na naprężenia wywołane ciśnieniem wiatru oraz odporności na zmienne warunki temperatury i zawilgocenia. Poddano ocenie zmienność wartości tych parametrów w odniesieniu do miejsca usytuowania próbki w obrębie płyty. Zwrócono uwagę na konieczność przyjęcia zasady ostrożności przy uwzględnianiu wyników badań do obliczeń projektowych, zapewniającej bezpieczne zastosowanie kamienia o dużym zróżnicowaniu właściwości.

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; [rembisi@agh.edu.pl](mailto:rembisi@agh.edu.pl); [kosla@agh.edu.pl](mailto:kosla@agh.edu.pl)

## LITOLOGIA MARMURU

Marmur *Fior di Pesco Carnico*, stanowiący przedmiot badań, pochodzi z jednego z licznych złóż zlokalizowanych w prowincji Udine, znajdującej się w regionie Friuli, w północno-wschodniej części Włoch, tuż przy granicy austriacko-włoskiej (ryc. 1). Jest to zachodnia część Alp Karnickich, które przynależą do Południowych Alp Wapiennych w Alpach Wschodnich. Alpy Karnickie są

zlokalizowane na południowej krawędzi europejskich warwyscydów i wykazują ciągłość zapisu sedimentacji od późnego ordowiku do permu (Hubich, Läufer, 1996, 1997; Venturini, Spalletta, 1998; Läufer i in., 2001). Omawiany marmur powstał w wyniku przeobrażenia cienkoławicowych, mikrytowych i mikrosparytowych wapieni dewońskich, zachodzącego w warunkach metamorfizmu niskiego stopnia, w zakresie temperatury od 300 do 450°C (Läufer i in., 2001). W sekwencji litostratygraficznej wapienie te



Ryc. 1. Lokalizacja miejsca występowania marmuru *Fior di Pesco Carnico* (opracowane na podstawie: Hubich, Läufer, 1996)  
Fig. 1. Location of the marble *Fior di Pesco Carnico* (modified after Hubich, Läufer, 1996)



Ryc. 2. Fragment płyty marmuru *Fior di Pesco Carnico* z widocznym układem licznych, wzajemnie się przecinających żył  
Fig. 2. Part of a slab of the marble *Fior di Pesco Carnico* showing the distribution of many mutually intersecting veins



znajdowały się między sylurskimi wapieniami gruzłowymi, a dolno- i środkowodewońskimi wapieniami biodetrytycznymi. Charakteryzowały się brakiem bioklastów i materiału detrytycznego (Hubich, 1992; Läuffer i in., 2001), wykazywały natomiast laminację, której obecność miała wpływ na powstanie niejednorodnego strukturalnie i teksturalnie marmuru. Ta zmienność jego budowy wewnętrznej jest wyraźnie zauważalna nawet w obrębie jednego bloku lub wyciętej z niego płyty. Wyraża się ona przede wszystkim różnorodnością i kontrastowością barwy – od jasnoszarej do ciemnoszarej, miejscami beżowej z fioletowym odcieniem i różnym udziałem oraz nierównomiernym rozmieszczeniem poszczególnych elementów strukturalnych: białych, beżowych i rdzawych żył, soczewek, nieregularnych skupień kalcytu i zdeformowanych fragmentów lamin (ryc. 2). Elementy te mogą być odmiennie eksponowane w różnych przekrojach przecinanego bloku skalnego, co pozwala na uzyskanie dodatkowych, często zaskakujących efektów wizualnych, wzbogacających asortyment odmian ozdobnych tego kamienia. Walory dekoracyjne oraz jakość marmuru są częściowo obniżane przez obecność stylolitów o ciemnoszarym i rdzawym zabarwieniu oraz otwartych spękań i niewielkich kawern.

### METODYKA BADAŃ

Do badań wybrano dwie płyty marmuru o grubości 3 i 5 cm. W obrębie każdej z nich wydzielono trzy obszary (strefy) różniące się między sobą ilością i sposobem ułożenia poszczególnych elementów strukturalnych. Jako strefę A określono nierównoblastyczne tło skalne z pojedynczymi żyłkami lub drobnymi skupieniami białego kalcytu (ryc. 3). Strefę B charakteryzują liczne, wzajemnie przecinające się cienkie, ciemnoszare i beżowe żyłki średnioblastycznego kalcytu, a w strefie C dominują grube, białe żyły gruboblastycznego kalcytu z domieszką tlenków i wodorotlenków żelaza (ryc. 3). Ze skał w każdej ze stref wycięto oddzielne zestawy próbek przeznaczone do analizy petrograficznej oraz do badań cech wytrzymałościowych. Obejmowały one określenie odporności marmuru na cykliczne ogrzewanie i chłodzenie w warunkach zawilgocenia (tzw. *bowing*), ponadto oznaczenie wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej, w stanie naturalnym oraz po 14 i 48 cyklach zamrażania/rozmarzania, a także pomiar obciążenia niszczącego przy otworze na kołek.

Na preparatach mikroskopowych wykonano oddzielnie dla każdej z wydzielonych stref pogłębioną analizę petrograficzną (AGA – *Adjacent Grain Analysis*) opisaną w normie PN-EN 16306: 2013-06. Jest to metoda umożliwiająca charakterystykę mikrotekstury marmuru kalcytowego w zakresie wzajemnych relacji przestrzennych istniejących między blastami kalcytu. Służy do wstępnej oceny podatności płyt marmuru na ugięcie wywołane cyklicznie zachodzącymi zmianami temperatury i zawilgocenia. W pierwszej kolejności w mikroskopie optycznym zmierzono średnice Fereta 300 ziaren ułożonych wzdłuż przyjętych linii pomiarowych, określając średnią wielkość ziaren w skale. Następnie dla każdego z 50 ziaren (oznaczanego jako G) o obliczonej średniej wielkości, określono liczbę ziaren bezpośrednio do nich przylegających (AG). Wynik, czyli wartość wskaźnika AGA, odpowiada liczbie ziaren AG przylegających do ziarna G średnio dla całej próbki. Wartość AGA wskazuje na podatność, względnie

odporność marmuru w zmiennych warunkach temperatury i wilgoci.

Pogłębiona analiza petrograficzna jest metodą szybką, którą należy traktować jako badanie poprzedzające bardziej praco- i czasochłonne, ale dokładniejsze badania wielkości ugięcia i zmiany wytrzymałości na zginanie próbek poddanych cyklicznym zmianom temperatury. Aby wynik był reprezentatywny, pomiary należy wykonać dla różnych fragmentów skały, odzwierciedlających zmienność wielkości jej blastów. W przypadku gdy oznaczona zostanie zbyt niska wartość AGA – wynosząca poniżej 6, konieczne jest wykonanie badań odporności marmuru na cykliczne zmiany temperatury, wraz z określeniem wielkości ugięcia i procentowej zmiany wytrzymałości na zginanie lub zmiany dynamicznego modułu elastyczności po cyklach ogrzewania-chłodzenia. Takie badania wykonano dla analizowanych marmurów zgodnie z zapisem normy PN-EN 16306: 2013-06. Próbkę o wymiarach 400 mm × 100 mm × 30 mm zostały częściowo zanurzone w wodzie i ogrzewane od góry do temperatury 80°C, a następnie chłodzone. Wykonano 50 cykli ogrzewania i chłodzenia. Po każdym z pierwszych pięciu cykli, a następnie co pięć cykli wykonano pomiary ugięcia płyty kamiennej. Po ostatnim cyklu określono procentową zmianę wartości wytrzymałości na zginanie w stosunku do próbki odniesienia, której nie poddano ogrzewaniu.

Na innym zestawie próbek oznaczono wartość wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej. Badanie to wykonano zgodnie z normą PN-EN 12372: 2007 na próbkach o wymiarach 300 mm × 50 mm × 50 mm. Były one podparte na rolkach podporowych i za pośrednictwem rolki położonej na środku ich górnej powierzchni stopniowo obciążano je w maszynie wytrzymałościowej aż do momentu zniszczenia próbki. Wartość parametru obliczono, uwzględniając wielkość obciążenia niszczącego, szerokość i wysokość przekroju poprzecznego próbki w miejscu zniszczenia oraz odległość między osiami rolek podporowych. Oznaczenie wykonano dla próbek w stanie naturalnym (tzw. stanie powietrzno-suchym) oraz dla próbek, które zostały poddane 14 i 48 cyklom zamrażania/rozmarzania wykonanego zgodnie z normą PN-EN 12371: 2010.

Wartość obciążenia niszczącego przy otworze na kołek wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 13364: 2002 na próbkach o wymiarach 200 × 200 × 30 mm. Kołki osadzano w otworach wywierconych w bocznych ścianach płytki, a następnie działając na nie zwiększającym się równomiernie obciążeniem, określano jego wartość powodującą wyłamanie kołka.

Dla dwóch ostatnich parametrów, zgodnie z zaleceniami normowymi, wg wzoru obliczono niższą wartość oczekiwaną, niezbędną do określenia obliczeniowych parametrów wytrzymałościowych materiału kamiennego.

$$E = e^{-\bar{x}_{\ln} - k_s \cdot S_{\ln}}$$

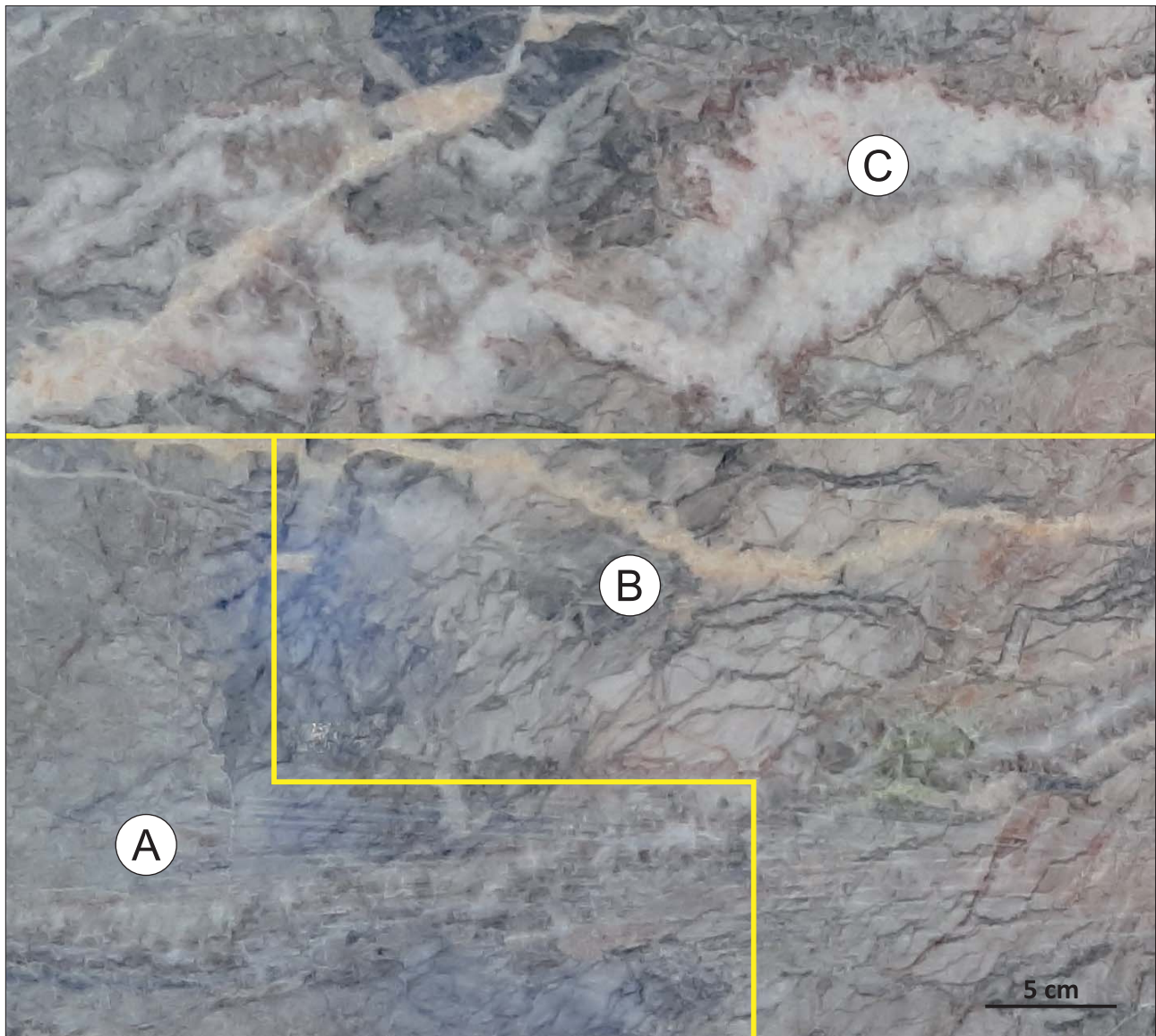
gdzie:

$e$  – liczba Eulera,

$\bar{x}_{\ln}$  – średnia logarytmiczna,

$S_{\ln}$  – logarytmiczne odchylenie standardowe,

$k_s$  – współczynnik do estymacji kwantyli zależny od liczebności próbek.



**Ryc. 3.** Płyta marmuru z wydzielonymi strefami o różnych cechach strukturalnych. **A** – nierównoblastyczne tło skalne z pojedynczymi żyłkami lub drobnymi skupieniami białego kalcytu, **B** – liczne, wzajemnie przecinające się cienkie, ciemnoszare i beżowe żyłki średnioblastycznego kalcytu, **C** – liczne grube, białe żyły gruboblastycznego kalcytu z domieszką tlenków i wodorotlenków żelaza  
**Fig. 3.** The marble slab with zones of different textural features. **A** – vari-blastic rock groundmass with single veinlets or fine accumulations of white calcite, **B** – numerous mutually intersecting dark grey and beige thin veins of medium-blastic calcite, **C** – numerous thick, white veins of coarse-blastic calcite with an admixture of iron oxides and oxyhydroxides

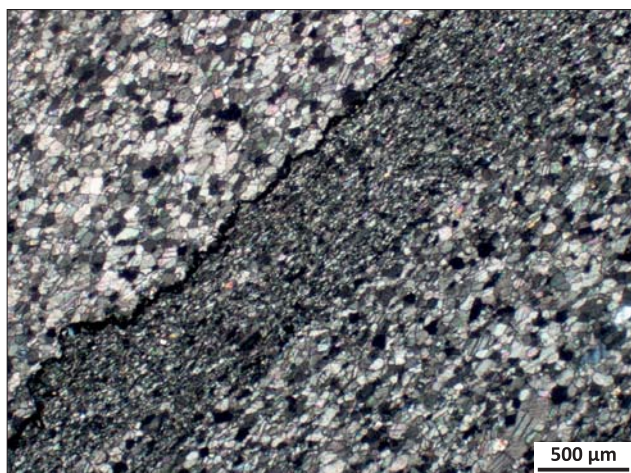
Jest to jeden z parametrów statystycznych opisujących rozkład zmiennych losowych, który pełni rolę kryterium wyboru w warunkach ryzyka. W odróżnieniu od średniej arytmetycznej, przy jego obliczeniu odrzuca się wartości anomalne, które mogą zawyżać wartość analizowanej cechy badanego materiału.

### WYNIKI BADAŃ

Analiza petrograficzna wykazała, że podstawowe tło skalne marmuru jest złożone ze średnio- i drobnoblastycznego, ksenoblastycznego kalcytu. Blasty o różnych wielkościach są ułożone naprzemiennie w cienkich, pofałdowanych laminach (ryc. 4) lub tworzą nieregularne skupienia, bądź też nie wykazują żadnego uporządkowania. Mają pokrój izometryczny lub są lekko wydłużone, zwłaszcza występując w cieńszych laminach. Często między nimi występuje pigmentacja tlenkami i wodorotlenkami żelaza.

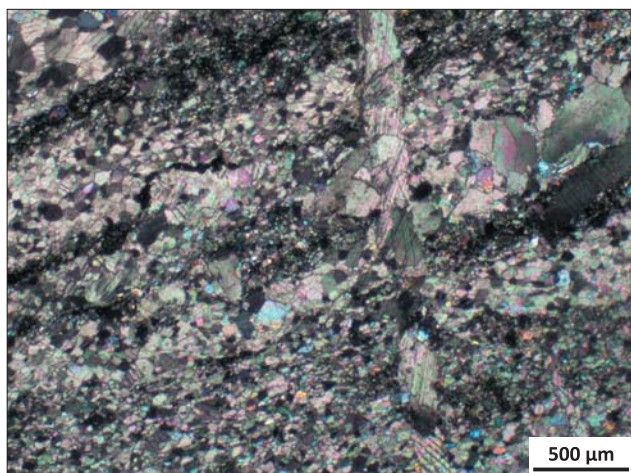
W obrębie tak wykształconego tła występują soczewki gruboblastycznego kalcytu o rozmiarach blastów dochodzących do 4 mm. Powszechnym zjawiskiem jest obecność żył, związana z deformacjami tektonicznymi, które doprowadziły do silnego, kilkugeneracyjnego rozczłonkowania ciągłości skały i przesunięcia fragmentów lamin względem siebie (ryc. 5). Rozdzielone w ten sposób części o różnych rozmiarach i kształtach uległy połączeniu różnobarwnym spoiwem kilku generacji, tworząc niezwykle dekoracyjne tło podstawowe z siecią żył o kontrastowym wypełnieniu. W makroskopowo białych żyłach jest tobecny głównie gruboblastyczny (do 5 mm), idioblastyczny kalcyt, natomiast w beżowych i rdzawych, wraz z grubo- i średnioblastycznym kalcytem, występuje domieszka drobnych skupień tlenków i wodorotlenków żelaza. Żyły mają różną grubość i długość, zmienne kierunki ułożenia oraz są nierównomiernie rozmieszczone. W niektórych miejscach są gęsto ułożone, przecinając się wzajemnie lub tworząc system





**Ryc. 4.** Mikroskopowy obraz marmuru w świetle przechodzącym. Widoczna jest laminacja marmuru, podkreślona zróżnicowaniem wielkości i kształtu blastów kalcytu. Pomiedzy laminami występuje stylolit. Polaryzatory skrzyżowane

**Fig. 4.** A photomicrograph of the marble in transmitting light. Lamination of the marble is expressed by differences in the size and shape of the calcite blasts. A stylolite occurs among the laminas. Crossed polarisers

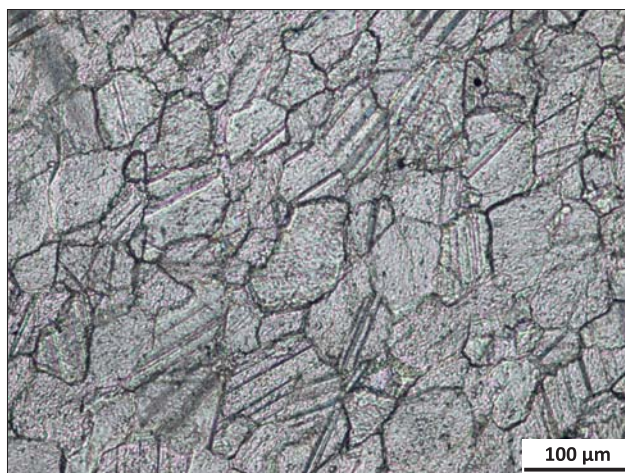


**Ryc. 5.** Mikroskopowy obraz marmuru w świetle przechodzącym. Widoczne są żyłki idioblastycznego kalcytu przecinające poprzecznie laminy zawierające blasty o różnych wielkościach. Polaryzatory skrzyżowane

**Fig. 5.** A photomicrograph of the marble in transmitting light. Small veins of idioblastic calcite intersect mutually displaced laminas composed of carbonate blasts of various sizes. Crossed polarisers

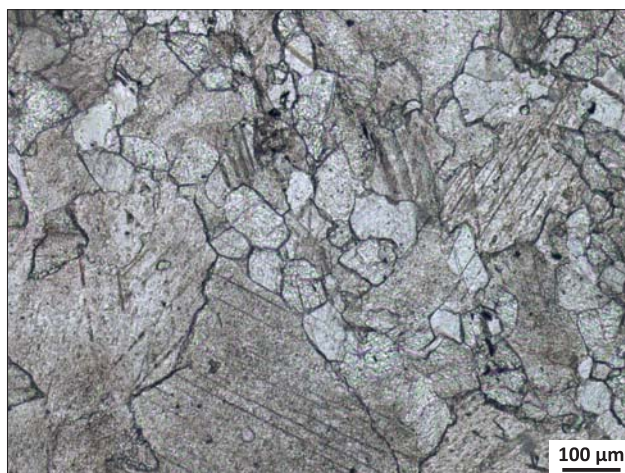
rozgałęziających się lub równoległych względem siebie wiązek. Sąsiadują z nimi strefy o mniejszym ich nagromadzeniu i rozmytych, niewyraźnych granicach między skupieniami ciemnoszarego i białego kalcytu.

Pogłębiona analiza petrograficzna wykonana dla trzech wydzielonych części marmuru wykazała, że blasty są niemal wyłącznie ksenomorficzne, o umiarkowanie rozwiniętej powierzchni, co sprawia, że kontakty między nimi są w przekrojach liniami wklęsło-wypukłymi lub prostymi, rzadziej są ząbkowane (ryc. 6, 7). We wszystkich badanych próbkach, bez względu na ich umiejscowienie w obrębie płyty marmuru, blasty o różnych rozmiarach są nierównomiernie rozmieszczone. Powoduje to, że obok miejsc, w których osobniki sąsiadujące bezpośrednio ze sobą mają podobne rozmiary (ryc. 6), występują skupienia blastów



**Ryc. 6.** Mikroskopowy obraz marmuru w świetle przechodzącym. Widoczne jest skupienie blastów kalcytu o zbliżonych względem siebie rozmiarach i stosunkowo prostych granicach międzyziarnowych. Jeden polaryzator

**Fig. 6.** A photomicrograph of the marble in transmitting light. The accumulation of calcite blasts with the comparable sizes and relatively long intergranular contacts. One polariser

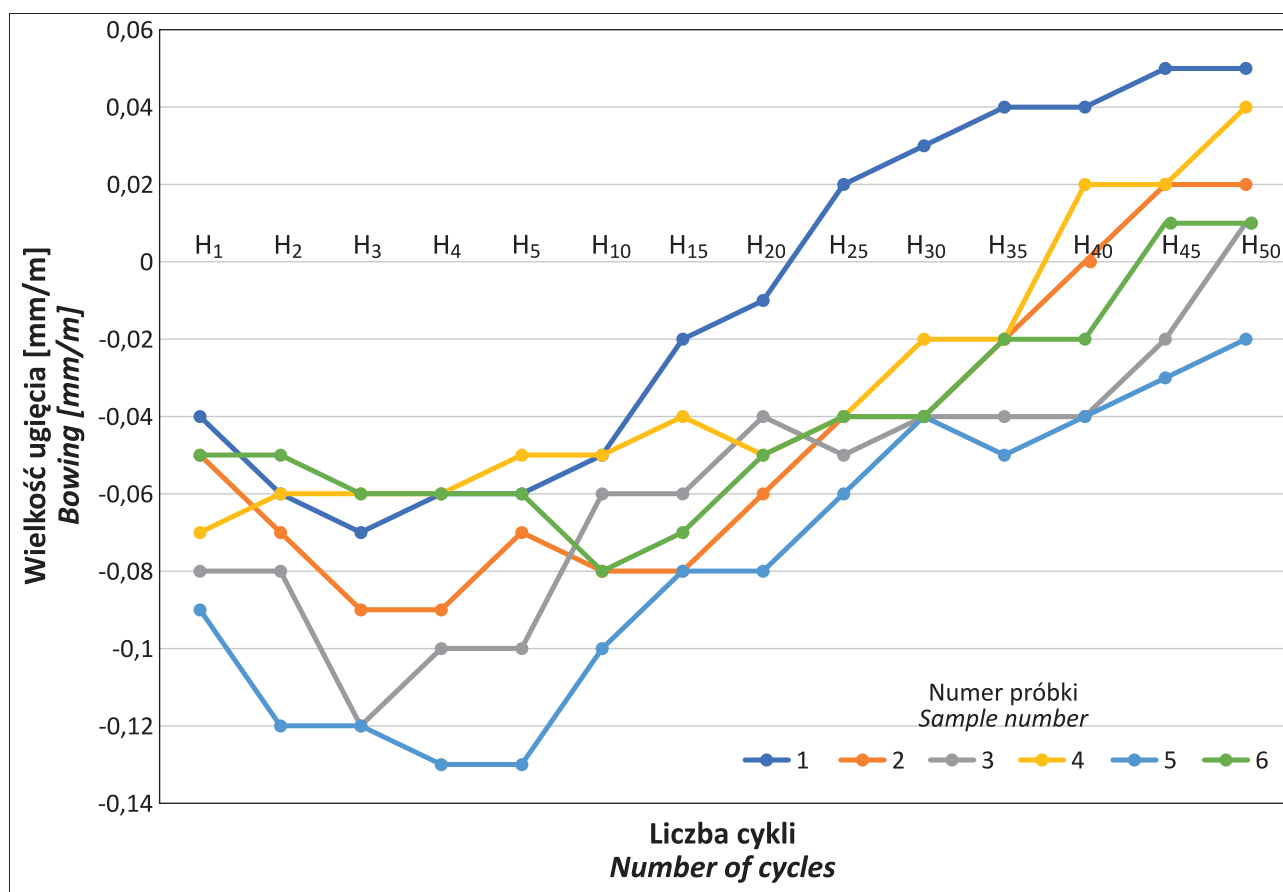


**Ryc. 7.** Mikroskopowy obraz marmuru w świetle przechodzącym. Widoczne jest skupienie blastów kalcytu o zróżnicowanych wielkościach. Obserwuje się znaczną różnorodność w liczbie ziaren wzajemnie stykających się. Jeden polaryzator

**Fig. 7.** A photomicrograph of the marble in transmitting light. The accumulation of the calcite blasts of different sizes. There is a considerable diversity in the number of grains in mutual contact. One polariser

wyraźnie różniących się wielkością (ryc. 7). Taki sposób ich rozmieszczenia sprawia, że w każdej z wydzielonych stref (A, B i C) marmuru występuje duże zróżnicowanie liczby ziaren wzajemnie się stykających, co wyraża się szerokim zakresem wartości wskaźnika AGA – od 4 do 11. Średnia wartość AGA dla każdej ze stref, a jednocześnie dla całego badanego marmuru wyniosła 6. Nieco inaczej wygląda budowa wewnętrzna grubych żył kalcytowych, w których idioblasty są ułożone mozaikowo o zwykle prostoliniowych kontaktach i mają wzajemnie porównywalne, zwykle duże rozmiary. Wartość AGA dla takich obszarów niemal zawsze mieści się w zakresie 4–8, a średnio wynosi ona 5.

Badanie wielkości ugięcia płyt marmuru pod wpływem cyklicznie działających zmian temperatury w zawilgoco-



Ryc. 8. Wielkość ugięcia płyt marmuru pod wpływem cyklicznie działających zmian temperatury w zawilgoconym środowisku (wg PN-EN 16306:2013-06)

Fig. 8. Bowing values of the marble plates resulting from cyclic temperature changes in a humid environment (acc. to the PN-EN 16306:2013-06 standard)

Tab. 1. Zmiany wartości wytrzymałości na zginanie marmuru po 50 cyklach ogrzewania i chłodzenia

Table 1. Changes of the bowing values of the FDP marble after 50 cycles of heating and freezing

Lp. No.	Wytrzymałość na zginanie pod działaniem siły skupionej (wg PN-EN 12372:2007) [MPa] Flexural strength under concentrated load (acc. to the PN-EN 12372:2007 standard) [MPa]		Spadek wartości wytrzymałości na zginanie marmuru po 50 cyklach badania [%] Decrease of the flexural strength after 50 cycles of the test [%]
	próbki odniesienia reference samples	próbki po 50 cyklach ogrzewania-chłodzenia samples after 50 cycles of heating-and-freezing	
1	17,9	14,5	19,0
2	12,5	9,9	20,8
3	8,8	6,7	23,9
4	11,6	8,7	25,0
5	5,7	4,1	28,1
6	13,2	10,3	22,0

nym środowisku, wykazało, że ulegają one zauważalnym zmianom. W interwale od kilku do kilkunastu początkowych cykli ogrzewania/chłodzenia badane płyty marmuru uległy ugięciu początkowo ku dołowi, w stronę powierzchni wody, nawet o 0,13 mm/m, po czym w trakcie kolejnych cykli stopniowo się prostowały. Ostatecznie, po 50 cyklach, jedna próbka, reprezentująca stosunkowo jednorodną część marmuru (strefa A), pozostała nieznacznie ugięta ku dołowi o 0,02 mm/m, co jest zaznaczone wartościami ujemnymi

wielkości ugięcia (ryc. 8). W pozostałych próbkach zawierających zwykle znaczny udział żył kalcytu (strefy B i C) doszło pod koniec badania do wyprostowania, a następnie wygięcia płyt w przeciwną stronę – ku górze, o wartość od 0,01 do 0,05 mm/m. Jednocześnie w próbkach tych, poddanych 50 cyklom ogrzewania/chłodzenia, stwierdzono znaczny spadek wartości wytrzymałości na zginanie w stosunku do próbek odniesienia o 19,0–28,1% (tab. 1). Największy spadek wartości tego parametru wykazały próbki silnie użyłone.

Badania marmuru wykazały dużą zmienność jego wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej, mieszczącą się w zakresie 2,6–19,6 MPa (tab. 2, ryc. 9). Największe wartości tego parametru (15,3–19,6 MPa) oznaczono w próbkach pochodzących z fragmentu marmuru zdominowanego przez nierównoblastyczne tło skalne, w obrębie którego obecne są pojedyncze żyłki i drobne soczewki białego kalcytu (strefa A). Po 14 cyklach zamrażania/rozmarzania wartość tego parametru zmniejszyła się średnio o 23,2%, a po 48 cyklach badania średnio o 37,3% w stosunku do stanu wyjściowego (tab. 2). Powierzchnia przełamu próbki była zwykle dość równa, a sam przełam dokonywał się najczęściej w połowie długości belki, w obrębie tła skalnego. W jednym przypadku belka pękła ukośnie wzdłuż żyłki kalcytu. W próbkach pobranych z części płyty zawierającej liczne, wzajemnie przecinające się cienie, ciemnoszare



**Tab. 2.** Wyniki badań wytrzymałości na zginanie marmuru pod działaniem siły skupionej oraz obciążenia niszczącego przy otworze na kołek**Table 2.** Values of the flexural strength under of the FDP marbleconcentrated load and of the breaking load at dowel hole

Lokalizacja próbki na płycie marmuru <i>Location of the sample on the marble plate</i>	Wytrzymałość na zginanie pod działaniem siły skupionej (wg PN-EN 12372:2007) [MPa] Flexural strength under the concentrated load (acc. to the wg PN-EN 12372:2007 standard) [MPa]			Obciążenie niszczące przy otworze na kołek (wg PN-EN 13364:2002) [N] Breaking load at dowel hole (acc. to the PN-EN 13364:2002 standard) [N]
	przed zamrażaniem <i>prior to freezing</i>	po 14 cyklach zamrażania <i>after 14 cycles of freezing</i>	po 48 cyklach zamrażania <i>after 48 cycles of freezing</i>	
Strefa A <i>Zone A</i>	19,6	15,2	13,6	2200
	16,8	11,7	10,2	1900
	17,7	14,3	12,1	2500
	17,6	14,7	10,3	1750
	17,1	12,5	9,7	1950
	15,3	11,7	9,6	1750
Strefa B <i>Zone B</i>	12,9	10,1	7,1	1200
	14,3	11,1	8,2	1550
	11,7	8,9	6,6	1350
	11,4	9,2	6,3	1100
	12,8	10,0	8,5	1600
	12,0	9,3	6,1	1100
Strefa C <i>Zone C</i>	*	*	*	900
	9,6	6,5	4,1	1050
	2,6	1,7	0,9	750
	3,2	2,3	1,3	950
	7,4	5,1	2,9	1000
	3,8	2,7	1,8	1000
	*	*	*	950
	6,0	4,5	2,8	900
Wartość minimalna <i>Minimum value</i>	2,6	1,7	0,9	750
Wartość maksymalna <i>Maximum value</i>	19,6	15,2	13,6	2500
Wartość średnia <i>Average value</i>	11,8	8,9	6,8	1372
Niższa wartość oczekiwana <i>Lower expected value</i>	3,1	2,1	1,1	663

\* Próbka rozpadła się bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia – nie była uwzględniana przy obliczaniu niższej wartości oczekiwanej.

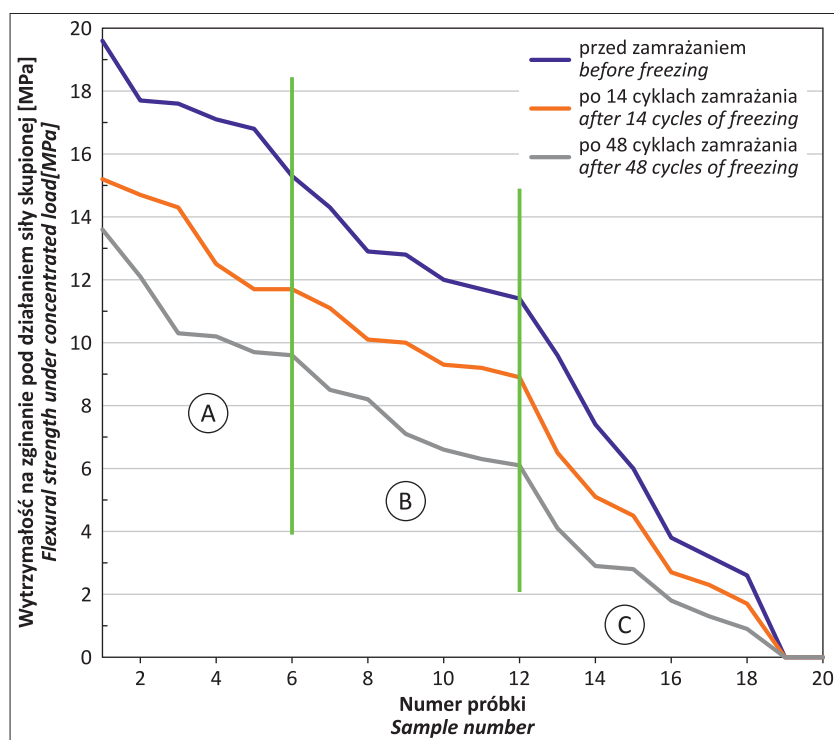
\* *Sample disintegrated after applying the load – it was not included in the calculation of the lower expected value.*

i beżowe żyłki średnioblastycznego kalcytu (strefa B), wytrzymałość na zginanie wynosiła 11,4–14,3 MPa (tab. 2). Po 14 cyklach badania mrozoodporności zmniejszyła się w podobnym zakresie jak dla strefy A, bowiem średnio o 22,0%, natomiast wyraźniejszy spadek wartości parametru wynoszący 43,0% stwierdzono po 48 cyklach. Pęknięcie próbki dokonywało się zwykle wzdłuż żyłek kalcytu i w zależności od ich ułożenia powstawało pośrodku lub przy brzegu belki, ukośnie lub prostopadle do jej dłuższego boku.

Najmniej odporny na obciążenie w warunkach zginania marmur okazał się w miejscach zasobnych w grube, białe żyły gruboblastycznego kalcytu z domieszką tlenków i wodorotlenków żelaza (strefa C). Dwie próbki rozpadły się na granicy żyłki i tła skalnego, bezpośrednio po przyłożeniu obciążenia, a w pozostałych oznaczono wartość tego parametru w zakresie 2,6–9,6 MPa (tab. 1). Po 14 cyklach zamrażania/rozdmrażania stwierdzono zmniejszenie wytrzymałości na zginanie średnio o 25,0%, czyli na

zbliżonym poziomie jak w strefach A i B. Wyraźne pogorszenie odporności marmuru na przyłożone obciążenie zaobserwowano po 48 cyklach, bowiem stwierdzono spadek wartości badanego parametru średnio aż o 58,1% (tab. 1). Rozpad próbek zachodził w obrębie żył kalcytu. Przełamy były zazwyczaj nierówne, ząbkowane, a ułożenie ich powierzchni było silnie uzależnione od ułożenia żyły w stosunku do ścian próbki (ryc. 10A, B).

Marmur wykazał zróżnicowaną odporność na obciążenie niszczące przy otworze na kołek, wynoszącą od 750 do 2500 N (tab. 2). Najwyższe wartości tego parametru (1750–2500 N) oznaczono w obrębie próbek zawierających pojedyncze żyłki kalcytu (strefa A). W części marmuru z licznymi cienkimi żyłkami kalcytu (strefa B) wartość parametru wyniosła 1100–1600 N, a w strefie C, obfitej w grube żyły kalcytowe, była najniższa, zawierając się w przedziale 750–1050 N. Wynik badania był także silnie uzależniony od miejsca umocowania kołków w obrębie płyty. Najniższe wartości parametru uzyskano w miejscach,



**Ryc. 9.** Zmiany wartości wytrzymałości na zginanie marmuru pod działaniem siły skupionej (wg PN-EN 12372:2007)

**Fig. 9.** Changes of the values of the marble bending strength under the concentrated load (acc. to the PN-EN 12372:2007 standard)

w których kołek był osadzony w otworze ułożonym w obrębie żyłki, równoległe do jej przebiegu oraz w miejscach przecinających się żyłek.

## DYSKUSJA WYNIKÓW I WNIOSKI

Procesy metamorfizmu przekształcające zróżnicowane strukturalnie i teksturalnie wapienie doprowadziły do utworzenia marmuru o dość nieregularnej teksturze z różnorodnie ukształtowanymi granicami blastów i znaczną rozpiętością ich rozmiarów. Według wyników różnych badań (Koch, 2006; Schouenborg i in., 2007; Bellopede i in., 2020) decyduje to o zmiennej sile wiązania istniejącej między ziarnami mineralnymi, które tworzą strukturę krystaliczną. Tym samym ma to wpływ na ich różną podatność względem odkształceń wywołanych wielokrotnym, nierównomiernym rozgrzewaniem i chłodzeniem oraz zmiennym zawilgoceniem zewnętrznej powierzchni płyty w stosunku

do jej części wewnętrznej. Odkształcenia te w dużym stopniu są wywołane naprężeniami wynikającymi ze znacznych różnic w zachowaniu się kryształów kalcytu pod wpływem ogrzewania i chłodzenia, bowiem ich długość ulega zwiększeniu w kierunku krystalograficznej osi  $c$  (współczynnik rozszerzalności liniowej  $\alpha = 26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), a zmniejszeniu równoległe do osi  $a$  ( $\alpha = -6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) (Skinner, 1966; Rao i in., 1968; Reeder, 1983; Sage, 1988). Wyraźną korelację między liczbą sąsiadujących ziaren (AGA) oraz ich kształtem (idioblastyczne lub ksenoblastyczne), a trwałością marmuru wykazali Åkesson i in. (2006) oraz Koch (2006). Z badań tych wynika, że bardziej podatne na odkształcenia są marmury o teksturze idioblastycznej i równoblastycznej oraz o niskiej wartości wskaźnika AGA, gdzie jeden kryształ kalcytu jest otoczony kilkoma sąsiednimi o podobnych rozmiarach i prostych ścianach. W takiej strukturze zdecydowanie łatwiej zachodzi propagacja pęknięć, a także rozszerzanie powstających szczelin i przemieszczanie się ziaren wzdłuż ich wzajemnych granic. Wnioski płynące z tego typu badań znalazły odzwierciedlenie w zapisach normy PN-EN 16306:2013-06,

wg których wartość AGA większa bądź równa 8 wskazuje na korzystną mikrostrukturę skały. Gdy wynosi ona 7, wówczas wynik jest przeciętny, natomiast wartość mniejsza lub równa 6 jest zbyt niska dla trwałego zachowania się elementu kamiennego względem zmian temperatury i wilgoci. Nie do końca jest jeszcze zbadany wpływ wody na wielkość deformacji płyt marmurowych. Z badań Schouenborga i in. (2007) wynika, że naprężenia powstają zarówno podczas procesu zwilżania, jak i suszenia skały, jednak energia potrzebna do inicjacji i propagacji pęknięć jest mniejsza niż w suchej.

Wyniki wykonanej analizy petrograficznej marmuru, wyrażone wartością AGA wynoszącą średnio 6, oraz umiarkowanie rozwinięta powierzchnia blastów wskazują na potencjalną podatność tej skały na odkształcenia wywołane następującym po sobie ogrzewaniem i studzeniem w warunkach silnego zawilgocenia. Nieznacznie niższa wartość AGA = 5 stwierdzona dla blastów budujących



**Ryc. 10.** Próbką marmuru po wykonaniu badania wytrzymałości na zginanie. Widoczny jest przełam próbki powstały w obrębie żyłki kalcytu. **A** – widok bocznej ściany próbki, **B** – powierzchnia przełamu próbki

**Fig. 10.** A marble sample after the bending test. The photograph presents a fracture of the sample developed within a calcite vein. **A** – side of the sample, **B** – fracture surface



żyły kalcytowe wskazuje na nieco większą zdolność do odkształcania się skały w tych strefach. Potwierdziły to wyniki badania wielkości ugięcia płyt. Należy jednak podkreślić, że powstałe odkształcenia w zakresie od  $-0,02$  do  $0,05$  mm/m są niewielkie, znacznie niższe od granicznych wartości określonych w normie PN-EN 16306:2013-06. W żadnej z badanych próbek, po 50 cyklach badania, nie została przekroczona dopuszczalna granica ugięcia wynosząca  $0,40$  mm/m. Ponadto wielkość narastającego ugięcia określona w ostatnich dwóch pomiarach nie przekroczyła założonego poziomu  $0,02$  mm/m. Wartości te są także niższe od oznaczonych w innych kalcytowych marmurach włoskich i portugalskich o wartości AGA w zakresie 6–10, w których wielkość ugięcia wynosiła  $0,17$ – $6,0$  mm/m (Bellope de i in., 2020). W warunkach naturalnej, wieloletniej ekspozycji płyt tego marmuru na elewacjach wielkość ugięcia może dochodzić nawet do  $14$  mm (Koch, 2006; Siegesmund i in., 2008).

Analiza petrograficzna, której efektem jest ocena rozmiarów i kształtu blastów oraz ich wzajemnych relacji, mimo iż nie pozwala na pomiar wielkości odkształcenia ani też nie umożliwia prognozowania utraty wytrzymałości wraz z postępem czasu, to daje jednak wiarygodną podstawę do oceny zasadności wykonywania dodatkowych, kosztownych i długotrwałych badań laboratoryjnych. Obie metody badawcze określone normą PN-EN 16306:2013-06, a więc pomiar wskaźnika AGA i wielkości ugięcia, są uzupełnione oznaczeniem zmiany wytrzymałości na zginanie zachodzącej po cyklach zmian temperaturowych. Zapewnia to wyraźne wskazanie wielkości potencjalnego spadku wytrzymałości kamienia w czasie, a tym samym dostarcza ważnych danych obliczeniowych do prognozowania jego żywotności. Dla analizowanego marmuru spadek wartości wytrzymałości na zginanie po zakończeniu 50 cykli badania wyniósł  $19,0$ – $25,0\%$ . Są to wielkości zbliżone do oznaczonych dla tego rodzaju marmurów przez Siegesmunda i in. (2008), ale niższe od wartości dochodzących nawet do  $45\%$  w niektórych marmurach badanych przez Bellope de i in. (2020). Należy zatem stwierdzić, że marmur *Fior di Pesco Carnico* charakteryzuje się przeciętną podatnością na odkształcenie, co powinno być brane pod uwagę przed podejmowaniem decyzji o jego zastosowaniu. Trzeba przy tym pamiętać, że wpływ na wielkość odkształcania się płyt marmuru może mieć także sposób pozyskania bloku z wyrobiska, a także kierunek wycięcia płyty z bloku i jej grubość. W zależności od kierunku cięcia podatność na ugięcie oraz wytrzymałość na zginanie płyty może się różnić nawet trzykrotnie (Koch, 2006).

Przedstawiona zmienność cech strukturalnych analizowanego marmuru, a zwłaszcza nierównomierne rozmieszczenie żył w obrębie tła skalnego, wiąże się w ścisły sposób z bardzo ważnym zagadnieniem niejednorodności jego cech użytkowych oraz problemem wiarygodności wyników zależnych od sposobu opróbowania. Często na podstawie posiadanych danych nie ma możliwości powiązania wartości parametrów technicznych kamienia z jego cechami litologicznymi. W związku z tym występuje problem z pełniejszą interpretacją uzyskanych wyników badań i w dalszej kolejności trudność w podjęciu właściwej decyzji o wyborze lub odrzuceniu kamienia dla określonego zastosowania.

Dodatkowe możliwości interpretacyjne, a zwłaszcza wskazanie elementów strukturalnych, które mają największy wpływ na obniżanie cech wytrzymałościowych, można uzyskać pobierając próbki do badań w takich miejscach,

aby reprezentowały one jak najpełniejszy zakres zmienności litologicznej kamienia. Dla tak dobranych próbek marmuru *Fior di Pesco Carnico* wykonane oznaczenia wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej i obciążenia niszczącego przy otworze na kołek wykazały ich wyraźne zróżnicowanie uzależnione od lokalizacji próbki badawczej.

Marmur *Fior di Pesco Carnico* charakteryzuje się raczej niską wartością wytrzymałości na zginanie ( $11,8$  MPa) w stosunku do innych zbliżonych litologicznie włoskich marmurów kalcytowych, takich jak np.: Bardiglio, Calacatta, Cipollino Creme Tirreno, Bardiglio, Grigio Carnico, Grigio Romano, Nuvolato Lorano, dla których wartości te wynoszą od  $13,3$  do  $24,1$  MPa. Chociaż zdarzają się także marmury o niższej wartości tego parametru jak np. Cipollino Apuano, którego wytrzymałość na zginanie wynosi  $8,3$  MPa (ICONS, 2000; Börner, Hill, 2003). Część badanych próbek marmuru wykazała wyraźne odchylenie wartości od podanej średniej, mieszczące się w zakresie  $2,6$ – $19,6$  MPa. Podobny zakres zmienności stwierdzono dla próbek poddanych cyklom zamrażania oraz badanych pod kątem obciążenia niszczącego przy otworze na kołek (tab. 2). Przy tak zmiennym materiale kamiennym posługiwanie się wartością średnią przy dokonywaniu obliczeń statycznego i dynamicznego obciążenia płyt na elewacji jest ryzykowne, bowiem może prowadzić do zawyżenia przyjętych wartości, z konsekwencjami szybszego zużycia kamienia, względnie ryzykiem jego uszkodzenia, połączonego z naruszeniem bezpieczeństwa użytkowania obiektu budowlanego. Podejmując decyzję o dopuszczeniu kamienia do zastosowania w obiekcie, projektant powinien się kierować zasadą ostrożności i wybierać zawsze opcję zapewniającą wyższy stopień bezpieczeństwa. Jedną z możliwości jest selekcja materiału kamiennego obejmująca eliminację całych płyt albo ich fragmentów zawierających elementy lub strefy, które nie spełniają przyjętych wymogów jakościowych. W przypadku omawianego marmuru działaniem możliwym do przeprowadzenia byłaby selekcja płyt polegająca na odrzuceniu tych, które zawierają dużą ilość grubych, białych żył gruboblastycznego kalcytu (strefa C). Po takim zabiegu pozostały materiał kamienny charakteryzowałby się znacznie wyższą wartością parametrów technicznych. Jeżeli taka selekcja nie byłaby możliwa np. z powodów ekonomicznych, niedoborów materiału itp., wówczas, dla zwiększenia stopnia bezpieczeństwa, w obliczeniach powinna zostać uwzględniona jak najniższa wartość oczekiwana, czyli taka, której średnio spodziewany wynik jest najgorszy. Rolę kryterium wyboru powinna zatem spełniać niższa wartość oczekiwana (NWO), której sposób obliczania podany jest w normach dotyczących metod badań kamienia naturalnego. Dla omawianego marmuru NWO wytrzymałości na zginanie wynosi  $3,1$  MPa, ulegając po  $14$  i  $48$  cyklach zamrażania zmniejszeniu odpowiednio do  $2,1$  MPa i  $1,1$  MPa (tab. 2). W przypadku obciążenia niszczącego przy otworze na kołek wynosi ona tylko  $663$  N, czyli mniej niż oznaczona badaniami wartość minimalna tego parametru. W sytuacji konieczności zapewnienia dużego poziomu bezpieczeństwa najbardziej wskazanym rozwiązaniem byłoby odrzucenie materiału o najgorszej jakości i wykorzystanie w obliczeniach niższej wartości oczekiwanej określonej dla pozostawionej, wyselekcjonowanej części kamienia.

Praca była częściowo finansowana przez AGH Akademię Górniczo-Hutniczą (nr umowy 16.16.140.315/10). Autorzy składają podziękowanie Recenzentom oraz Redakcji Przeglądu Geologicznego za poświęcony czas oraz cenne uwagi dotyczące treści artykułu i jego formy.

## LITERATURA

- ÅKESSON U., LINDQVIST J.E., SCHOUENBORG B., GRELK B. 2006 – Relationship between microstructure and bowing properties of calcite marble claddings. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 65 (1): 73–79.
- BELLOPEDE R., ZICHELLA L., MARINI P. 2020 – Marble durability assessment by means of total optical porosity and adjacent grain analysis. *Key Eng. Material.*, 848: 35–47.
- BÖRNER K., HILL D. 2003 – *Natural Stones Worldwide*. Abraxas Verlag, Hasede.
- BROMOWICZ J. (red.), FIGARSKA-WARCHOŁ B., KARWACKI A., KOLASA A., MAGIERA J., REMBIŚ M., SMOLEŃSKA A., STAŃCZAK G. 2005 – *Waloryzacja polskich złóż kamieni budowlanych i drogowych na tle przepisów Unii Europejskiej*. Uczel. Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH: 1–113.
- CARDANI G., MEDA A. 1999 – Flexural strength and notch sensitivity in natural building stones: Carrara and Dionysos marble. *Construct. Build. Material.*, 13 (7): 393–403.
- HUBICH D. 1992 – Die vulkanoklastische Fleonsformation in den westlichen Karnischen Alpen: Sedimentologie, Petrographie und Geochemie. *Jahrb. Geol. BA.*, 135: 331–379.
- HUBICH D., LÄUFER A.L. 1996 – First results on Variscan kinematics and nappe stacking in the Carnic Alps (Southern Alps). *Schweiz. Tektonik. Basel*, 14: 15.
- HUBICH D., LÄUFER A.L. 1997 – Variscan kinematics and nappe tectonics in the Carnic Alps (Southern Alps). *Terra Nova*, 9: 495.
- ICONS 2000 – *Interactive Catalogue of Natural Stones*. Variogramma, Lisbona.
- KOCH A. 2006 – Deformation von Fassadenplatten aus Marmor. *Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden*. Universitätsverlag Göttingen, 1–173.
- KOURKOULIS S.K., EXADAKTYLOS G.E., VARDOULAKIS I. 1999 – U-notched Dionysos-Pentelicon marble beams in three point bending: The effect of nonlinearity, anisotropy and microstructure. *Inter. J. Fracture*, 98: 369–392.
- LÄUFER A.L., HUBICH D., LOESCHKE J. 2001 – Variscan geodynamic evolution of the Carnic Alps (Austria/ Italy). *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 90: 855–870.
- PN-EN 12371: 2010 – *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie mrozoodporności*. PKN.
- PN-EN 12372:2007 – *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie wytrzymałości na zginanie pod działaniem siły skupionej*. PKN.
- PN-EN 13364:2002 – *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie obciążenia niszczącego przy otworze na kotek*. PKN.
- PN-EN 16306:2013-06 – *Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie odporności marmuru na cykliczne zmiany temperatury i wilgoci*. PKN.
- RAO K.V.K., NAIDU S.V.N., MURTHY K.S. 1968 – Precision lattice parameters and thermal expansion of calcite. *J. Phys. Chem. Sol.*, 29: 245–248.
- REEDER J. 1983 – Carbonates: Mineralogy and chemistry. *Rev. Mineral., Mineral. Soc. Am.*, 11: 1–400.
- SAGE J.D. 1988 – Thermal microfracturing of marble. [W:] Marinos P.G., Koukis G.C. (red.), *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*. Balkema, Rotterdam: 1013–1018.
- SCHOUENBORG B., GRELK B., MALAGA K., HOIGARD K., SCHEFFLER M., DEAN S.W. 2007 – Testing and Assessment of Marble and Limestone (TEAM) – Important Results from a Large European Research Project on Cladding Panels. *J. ASTM Inter.*, 4 (5): 1–13.
- SIEGISMUND S., RUEDRICH J., KOCH A. 2008 – Marble bowing: comparative studies of three different public building facades. *Environ. Geol.*, 56 (3–4): 473–494.
- SKINNER B.J. 1966 – Thermal expansion. [W:] Clark S.P. (red.), *Handbook of physical constants*. *Geol. Soc. Am.*, 97: 75–96.
- VENTURINI C., SPALLETTA C. 1998 – Remarks on the Paleozoic stratigraphy and the Hercynian tectonics of the Palaeocarnic chain (Southern Alps). [W:] Perri M.C., Spalletta C. (red.), *Southern Alps field trip guide book ECOS VII*. *Giorn. Geol.*, 60: 69–88.
- WANG Y., GAO S., LIU D., LI CH. 2020 – Anisotropic fatigue behaviour of interbedded marble subjected to uniaxial cyclic compressive loads. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43 (6): 1170–1183.

Praca wpłynęła do redakcji 22.11.2021 r.  
Akceptowano do druku 15.12.2021 r.