

TADEUSZ TURKIEWICZ

The State School of Higher Education in Chelm
e-mail: tturkiewicz@pwsz.chelm.pl

JACEK GÓRA

Lublin University of Technology
e-mail: j.gora@pollub.pl

WOJCIECH PIASTA

Kielce University of Technology
e-mail: wpiasta@tu.kielce.pl

THE EFFECT OF IGNEOUS ROCK AGGREGATES ON FLEXURAL AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Abstract

The test results presented concern ordinary concretes containing 5 coarse crushed aggregates made from igneous rocks and one made from gravel. The two aggregates i.e. granite and basalt were from southwest Poland and three i.e. granite, basalt, granodiorite were from West Ukraine. Natural gravel was comparatively tested as well. The tests of aggregates dealt with bulk density, grinding ratio, content of irregular grains and content of mineral powder. Flexural and compressive strength of concretes were tested after 28 and 365 days. Better strength properties of concretes containing Polish aggregates in relation to comparable petrographic Ukrainian aggregates were found.

Keywords: igneous rock crushed aggregates, Polish aggregates, Ukrainian aggregates, flexural and compressive strength of concrete

1. Introduction

Coarse aggregate as a filler in concrete also restrains the shrinkage of cement paste. This results in considerable local stresses which may produce microcracks in the interface zone if the cement paste-aggregate bond is too weak [1]. In concrete like in other composite materials, the difference in modulus of elasticity of the matrix (mortar) and the filler (coarse aggregate) contribute to stress concentration in the interface zone, which affects the strength and overall performance of concrete. The first microcracks in concrete begin to propagate preferentially along cement paste-aggregate interfaces due to shrinkage right before loading. Low fracture strength of concrete results among others from the occurrence of shrinkage microcracks and low crack resistance of the interface zone when concrete is under load [2]. The microcracks produced locally in the interfaces initiate crack propagation between aggregate grains. Therefore, the role of coarse aggregate for fracture strength and thereby for tensile strength can be more considerable than for compressive strength. The tensile stress transfer mechanism depends on cement paste-

aggregate bond strength related to the nature, mineral composition and roughness of aggregate, as well as elastic and strength properties of aggregate [12].

In order to select the appropriate aggregate, its effect on tensile strength and crack resistance requires consideration as well. In accordance with the standards [9], tensile strength of concrete is assumed on the ground of compressive strength. It is incorrect to neglect the effect of coarse aggregate type on the tensile strength. It has been confirmed by test results [4], the tensile strength values f_{ctm} assumed by the standards are often overestimated. This is a reason for the studies of the effect of aggregate type on tensile strength of concrete.

Moreover, due to a shortage of coarse aggregate made from igneous rocks in the eastern regions of Poland for universal use, including road and bridge concrete, import of these aggregates from deposits in western Ukraine has begun. The quality and relevance of Ukrainian aggregates for concrete require investigation and checking whether they may replace the corresponding Polish aggregates.

2. Materials and test methods

There were tested 5 coarse crushed aggregates made from igneous rocks and one made from gravel. The two aggregates i.e. granite (marked BI) and basalt (BII) were from southwest Poland and the three ones i.e. granite (BIII), basalt (BIV), granodiorite (BV) were from West Ukraine. Comparatively tested was natural gravel B(VI) as well.

The tests of aggregates dealt with bulk density, grinding ratio, content of irregular grains and content of mineral powder.

Natural washed sand from Suwalki was used as fine aggregate. Its bulk density and content of dust amounted to 2.65 kg/dm^3 and 0.43% , respectively.

Each of the coarse aggregate tested was applied to cast concrete. Due to different density of coarse aggregates, their volume in each concrete type was the same. Sand content in aggregate composition, expressed by volume, amounted to 257 dm^3 .

Ordinary Portland cement CEM I 42.5R was used for each concrete. In all concretes the content of cement amounted to 350 kg/m^3 and w/c ratio was 0.55. Neither superplasticizer nor another admixture were applied. Composition of concrete mixes is given in Table 1.

Table 1. Composition of concrete mixes, kg/m^3

Components of concrete	Concrete					
	BI	BII	BIII	BIV	BV	BVI
cement, kg/m^3	350	350	350	350	350	350
coarse aggregate 2÷8 mm, kg/m^3	570	653	565	594	576	576
coarse aggregate 8÷16 mm, kg/m^3	568	633	595	657	576	576
sand 0÷2 mm, kg/m^3	681	681	681	681	681	681
water, dm^3/m^3	193	193	193	193	193	193
w/c ratio	0.55					

The consistency of concrete mixes, was determined by the slump [7], which was $9 \pm 3 \text{ cm}$. It corresponds to classes of S2÷S3 [10]. Air content in concrete mixes, determined by means of a pressure method was from 1.5 to 2.4%. The volumetric density of concrete mixes was tested as well [8]. Detailed test results of concrete mixes are shown in Table 2.

Table 2. Test results of concrete mixes

Concrete	Slump test result, cm	Air content, %	Bulk density, kg/dm^3
BI	5	2.0	2.39
BII	12	1.6	2.53
BIII	6.5	1.5	2.43
BIV	5	1.7	2.50
BV	5	2.2	2.39
BVI	12	2.4	2.32

From each concrete mix, the following specimens were cast: 6 beams $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ and 12 cubes $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$. The beams cured for 365 days were used to test flexural strength and the cubes cured for 28 and 365 days to test compressive strength.

3. Results and analysis

3.1. Aggregates

The test results of all aggregates were referred to the requirements of the Polish standards [5] in the first place. The requirements relating to the tested properties of aggregates are presented in Table 3.

Table 3. Codes rules in scope of tested aggregates according to PN-86/B-06712 [5]

No.	Properties of aggregates (table presents maximum permissible values)	Igneous and metamorphic rocks			Gravel		
		aggregate class			aggregate class		
		20	30	50	10	20	30
1	Resistance to crushing and grinding ratio, %	16	12	8	24	16	12
2	Content of irregular grains, %	25	20	10	30	25	20
3	Content of mineral dust, %	3.0	1.5	1.0	3.0	2.0	1.5

The research of physical and mechanical properties was conducted both with respect to aggregates applied, as well as concretes made with their use. The results are shown in Table 4 and 5, respectively.

Table 4. Tests results of aggregates properties

Aggregate type	Fraction mm-mm	Tested property						
		Bulk density kg/dm ³	Grinding ratio		Content of irregular grains		Content of mineral powder	
			X_{gr} %	X_{mm} %	Z_{gr} %	Z_{mm} %	Z_{pr} %	Z_{pm} %
granite pl (I)	2-8	2.60	14.9	15.1	4.9	3.0	0.16	0.13
	8-16		15.3		1.6		0.10	
basalt pl (II)	2-8	2.94	4.3	4.6	5.7	4.2	0.40	0.35
	8-16		4.9		2.7		0.30	
granite uk (III)	2-8	2.65	5.9	8.0	3.5	4.2	0.27	0.26
	8-16		9.8		4.8		0.24	
basalt uk (IV)	2-8	2.86	3.9	6.6	6.1	6.6	0.68	0.66
	8-16		8.5		6.9		0.65	
granodiorite uk (V)	2-8	2.63	6.2	6.0	10.3	8.3	0.28	0.26
	8-16		5.8		6.7		0.24	
gravel pl (VI)	2-8	2.63	7.5	9.3	0.7	3.1	0.22	0.21
	8-16		10.6		5.0		0.20	

Table 5. Test results of concrete strength

Concrete	Mean compressive strength, MPa				Mean flexural strength, MPa	
	28 days	s , MPa	365 days	s , MPa	365 days	s , MPa
		v , %		v , %		v , %
BI (granite pl)	45.1	1.48	51.1	2.06	4.95	0.17
		3.3		4.0		3.5
BII (basalt pl)	47.1	1.20	51.5	1.81	5.20	0.13
		2.5		3.5		2.4
BIII (granite uk)	43.4	1.64	47.3	2.06	4.38	0.21
		3.8		4.4		4.7
BIV (basalt uk)	46.0	1.75	50.4	1.96	4.96	0.18
		3.8		3.9		3.7
BV (granodiorite uk)	43.4	2.26	48.5	3.37	4.60	0.24
		5.2		6.9		5.1
BVI (gravel pl)	42.0	2.39	50.1	2.21	5.02	0.17
		5.7		4.4		3.4

In Poland, for many years it has been the compressive strength that constituted the base for qualitative assessment of aggregate in scope of mechanical properties, measured by means of the grinding ratio. This was confirmed by the requirements of PN-B-06250:1988 [6], according to which, if not provided otherwise in the subject standards for products, components and structures,

it is recommended to use aggregate of a class not worse than that of concrete. In today's standards, one cannot find that type of recommendations, however it shall be taken for granted that they were created on the basis of many years' experience, although scientific research suggests that there are exceptions to this rule in some cases. Considering the results of aggregate tests obtained, all types of aggregate

need to be classified, with the exception of granite pl (I), as aggregate class 50, that is as concretes of all strength classes according to [6]. However, granite pl (I) was classified as class 20, which means that it should be used, according to the standards [6] in concrete classes of C16/20 at the most. Regarding the resistance to crushing, gravel represents the highest class within its group that is class 30.

Analyzing test results of the content of irregular grains and mineral dust, all tested aggregates were classified as top class aggregates [5]. This means that in the former case the content of 10% was not exceeded and in the latter of 1% (for gravel 1.5%). The biggest content of irregular grains 8.3% was determined for the granodiorite uk (V), and in the case of mineral dust content 0.66% for basalt uk (IV).

Summarizing the aforesaid, all tested aggregates in terms of their properties subjected to tests, can be classified as high quality aggregates according to [5]. The exception is granite (I), classified as the lowest class 20, due to the result of crushing strength test.

3.2. Concretes

According to the compliance criteria set out in PN-EN 206-1:2003 [10] all concretes were classified as concrete compressive strength class C30/37. The difference in extreme values of average compressive strength after 28 days of curing between concretes (BII) basalt pl and B (III) granite uk is 12% (Fig. 1).

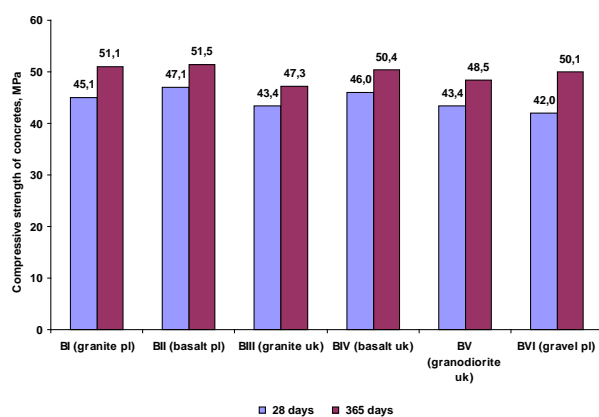


Fig. 1. Mean compressive strength of concretes cured 28 and 365 days

After 365 days, the difference was reduced to 9%, however it no longer referred to the same concretes. A bigger diversity was found in the case of flexural strength between the largest (BII) and smallest (BIII) value, and it is 19%. The best strength properties were found in the case of concrete made from Polish basalt aggregate (II), compressive strength after 365

days is 51.5 MPa and flexural strength is 5.20 MPa. The lowest strength values, however were found in the case of concrete with Ukrainian granite aggregate (III), 47.3 MPa for compressive strength and 4.38 MPa (Table 5) for flexural strength, respectively.

Comparing the results of strength tests of concrete made from relevant Polish and Ukrainian aggregates, slightly higher values in the case of concrete made from Polish aggregates were found. After 365 days, concrete BII (basalt pl) had the compressive strength of about 2% bigger than that of concrete BIV (basalt uk), and flexural strength of about 5%. However, differences in the strength of concrete with granite aggregates, concretes BI (granite pl) and BIII (granite uk) are 8% and 13% respectively, and in the case of granodiorite, concretes BI (granite pl) and BV (granodiorite uk) 5% and 8%. While considering test results in the case of comparative concrete BVI (gravel pl), the comparable strength properties were achieved (concrete BIV basalt uk) or bigger than in the case of Ukrainian aggregates. Considering better mechanical adhesion of cement paste to crushed aggregates than to oval and smooth gravel, these results seem to be quite surprising. It should be further noted that the biggest increase among all concretes (over 8 MPa i.e. almost 20%) of strength was after 365 days. Such good strength properties of concrete with gravel – especially after one year – are due to mineral composition of the grains. According to the research carried out by X-ray diffraction, about half of the grains of gravel were from carbonate rocks and contained calcite or a mixture of calcite and dolomite. However, these minerals react with the paste in the contact layer after some time, increasing adhesion of the aggregate to the hardened paste [3, 11, 13].

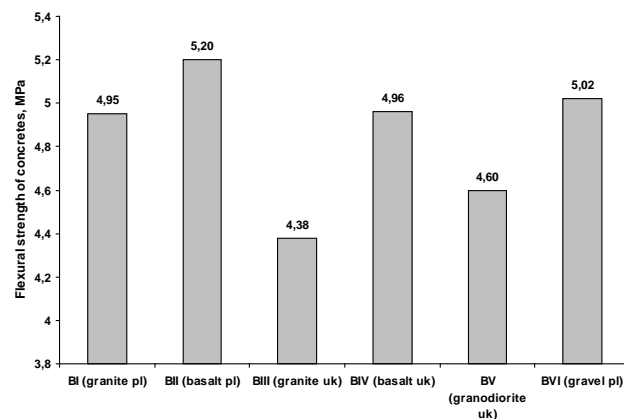


Fig. 2. Mean flexural strength of concretes cured 365 days

4. Conclusions

Despite the lowest resistance to crushing of granite aggregate from Siedlimowice near Strzegom, better strength characteristics of concrete in relation to comparable petrographic Ukrainian aggregates were found.

Comparing the results of concrete tests, the highest strength were obtained using basalt aggregate from the Winna Góra mine, and the lowest ones with granite aggregate from the Vyrivskij Karjer (III) mine. Nonetheless, all kinds of concrete were assigned to the same class of compressive strength.

High strength of concrete with gravel aggregate was related to the content of grains of carbonate rocks, which provided a stronger cement paste-aggregate interface zone.

References

- [1] Appa Rao G., Raghu Prasad B.K., *Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength*, Cement and Concrete Research 32 (2002), 253–257
- [2] Caliskan S., Karihaloo B.L., Barr B.I.G., *Study of rock mortar interfaces. Part I: Surface roughness of rock aggregates and microstructural characteristics of interface*. Magazine of Concrete Research, 54, (2002) 449–461
- [3] Interfacial transition zone in cement, E&FN Spon, London 1996
- [4] Piasta W., Budzyński W., Góra J., *Wytrzymałość na rozciąganie betonów zwykłych i wysokiej wytrzymałości z kruszywami ze skał magmowych i osadowych (Splitting tensile strength of normal and high strength concretes with aggregates from volcanic and sedimentary rocks)*, Przegląd Budowlany 10/2011, s. 62–67
- [5] PN-B-06712:1986 Kruszywa mineralne do betonu (Mineral aggregates for concrete)
- [6] PN-B-06250:1988 Beton zwykły (Normal concrete)
- [7] PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka (Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test)
- [8] PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość (Testing fresh concrete. Part 6: Density)
- [9] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków (Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1–1: General rules and rules for buildings)
- [10] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność (Concrete. Part 1: Specifications, performances, production and conformity)
- [11] Roy D.M., Langton C.A., *Morphology and Microstructure of Cement Paste-Rock Interfacial Regions*, 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris (1980), pp. 127–132
- [12] Saito M., Kawamura M., *Resistance of the cement-aggregate interfacial zone to propagation of cracks*, Cement and Concrete Research 16 (1986), pp. 653–661
- [13] Zimbelmann R., *A Contribution to the Problem of Cement-Aggregate Bond*, Cement and Concrete Research, Vol. 15 (1985), pp. 801–808

Tadeusz Turkiewicz
Jacek Góra
Wojciech Piasta

Wpływ kruszyw ze skał magmowych na wytrzymałość betonu na zginanie i ściskanie

1. Wprowadzenie

Kruszywo grube pełniąc rolę wypełniacza w betonie, ogranicza także skurcz zaczynu cementowego. Wywołuje to lokalnie naprężenia, które powodują powstawanie mikrorys w strefie przejściowej zaczyn-kruszywo, jeśli przyczepność zaczynu do kruszywa jest zbyt mała [1]. W betonie podobnie jak w innych

materiałach kompozytowych, różnice w modułach sprężystości matrycy (zaprawy) i wypełniacza (kruszywa grubego) przyczyniają się do koncentracji naprężeń w strefie przejściowej, która wpływa na wytrzymałość i inne cechy betonu. Mała wytrzymałość betonu na rozciąganie wynika m.in. z występowania mikrorys skurczowych i małej rysoodporności strefy

przejęciowej [2]. Utworzone lokalnie w strefach mikrorysy inicjują propagację rys pomiędzy ziarnami kruszywa. Dlatego rola kruszywa grubego dla rysoodporności, a poprzez to wytrzymałości na rozciąganie może być znacznie ważniejsza niż dla wytrzymałości na ściskanie. Mechanizm transferu naprężeń rozciągających zależy od przyczepności zaczynu do kruszywa, która jest związana z rodzajem, składem mineralnym i szorstkością kruszywa, a także właściwościami sprężystymi i wytrzymałościowymi kruszywa [12].

Dokonując wyboru właściwego kruszywa do betonu należy również zwrócić uwagę na jego wpływ na wytrzymałość na rozciąganie i rysoodporność. Brak uwzględnienia w zapisach normowych [9] wpływu rodzaju kruszywa grubego na wytrzymałość betonu na rozciąganie i uzależnianie jej wyłącznie od wytrzymałości charakterystycznej na ściskanie jest niesłuszne. W wielu przypadkach, potwierdzają to wyniki badań [4], normowe wartości wytrzymałości f_{cm} są w wielu przypadkach przeszacowane. Powyższe stwierdzenie jest kolejną przesłanką podjęcia się badań wpływu kruszywa na wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Ze względu na niedobór we wschodnich regionach Polski kruszyw grubych ze skał magmowych o uniwersalnym przeznaczeniu, w tym do wykonywania betonów drogowych i mostowych, kruszywa te zaczęto importować ze złóż w zachodniej Ukrainie. Jakość i przydatność kruszyw ukraińskich do betonów należy zbadać i sprawdzić, czy mogą zastąpić odpowiednio kruszywa polskie.

2. Materiały i metody badań

Badaniom poddano pięć kruszyw łamanych ze skał magmowych i jedno żwirowe. Dwa kruszywa pochodziły z południowo-zachodniej Polski – granit z Siedlimowic k. Strzegomia (oznaczenie I) i bazalt z Winięj Góry k. Piotrowic (II), a trzy z zachodniej Ukrainy – granit z kopalni Vyrivskij Karjer (III), bazalt z kopalni Iwaniczi (IV) oraz granodioryt z kopalni Klesov (V). Ponadto porównawczo zastosowano kruszywo naturalne otoczkowe z Sokółki k. Suwałk (VI).

Kruszywa przebadano w zakresie gęstości objętościowej, wytrzymałości na miażdżenie (określono wartości wskaźników rozkruszenia), zawartości ziaren nieforemnych oraz zawartości pyłów.

Jako kruszywo drobne zastosowano piasek naturalny, płukany z KSM Suwałki. Dla piasku wykonano badania gęstości pozornej i zawartości pyłów, które wyniosły odpowiednio $2,65 \text{ kg/dm}^3$ i $0,43\%$.

Z każdym z badanych kruszyw grubych wykonano betony. Ze względu na różne gęstości objętościowe poszczególnych kruszyw grubych ich objętość w każdym betonie była taka sama. Objętościowa zawartość piasku w składzie kruszywa wynosiła $257,0 \text{ dm}^3$.

Do każdego z betonów użyto tego samego cementu CEM I 42,5 R. We wszystkich betonach zachowano ten sam współczynnik $w/c = 0,55$ i stałe ilości cementu wynoszące 350 kg na 1 m^3 mieszanki. Do mieszanek betonowych nie stosowano żadnych dodatków i domieszek. Skład mieszanek betonowych został podany w tabeli 1.

Konsystencja mieszanek betonowych badana za pomocą metody opadu stożka [7], wyniosła $9 \pm 3 \text{ cm}$, co odpowiada klasie konsystencji S2/S3 [10]. Zawartość powietrza mierzona metodą ciśnieniową mieściła się w granicach od $1,5$ do $2,4\%$. Zbadano również gęstość objętościową przygotowywanych mieszanek [8]. Szczegółowe wyniki badań mieszanek betonowych zawiera tabela 2.

Z każdego rodzaju mieszanki betonowej wykonano 6 belek o wymiarach $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$ do badania wytrzymałości na zginanie i 12 próbek sześciennych o boku 100 mm do badania wytrzymałości na ściskanie. Badanie zginania wykonano po 365 dniach przechowywania próbek, a badania ściskania po 28 i 365 dniach.

3. Wyniki i analiza badań

3.1. Kruszywa

Badaniom właściwości fizycznych i mechanicznych poddano zarówno stosowane kruszywa jak i betony wykonane z ich zastosowaniem. Wyniki zamieszczono odpowiednio w tabelach 4 i 5.

Uzyskane wyniki badań wszystkich kruszyw w pierwszej kolejności odniesiono do wymagań określonych w polskich normach [5]. W tabeli 3 przytoczono wymagania w odniesieniu do badanych właściwości kruszyw.

W Polsce przez wiele lat w ocenie jakościowej kruszyw, w zakresie właściwości mechanicznych jako podstawową przyjmowano wytrzymałość na miażdżenie, której miarą jest wskaźnik rozkruszenia. Potwierdzono to wymaganiami normy PN-B-06250:1988 [6], zgodnie z którą, jeśli w normach przedmiotowych na wyroby, elementy i konstrukcje nie postanowiono inaczej, zaleca się stosowanie kruszywa o marce nie niższej niż klasa betonu. W obecnych normach nie znajduje się tego typu wskazań, jednak należy uznać, że powstały one na podstawie wieloletnich doświadczeń, choć badania naukowe

wskazują, że w pewnych przypadkach istnieją odstępstwa od tej reguły. Uwzględniając otrzymane wyniki badań kruszyw, należy sklasyfikować wszystkie, z wyłączeniem granitu pl (I), do marki kruszywa 50, czyli do betonów wszystkich klas wytrzymałościowych według [6]. Natomiast granit pl (I) został sklasyfikowany do marki 20, co oznacza, że powinien według wymagań normy [6] być stosowany do betonów klas co najwyżej C16/20. Kruszywo żwirowe w zakresie wytrzymałości na miążdżenie odpowiada najwyższej w swojej grupie marce 30.

Analizując wyniki badań zawartości ziaren nieforemnych oraz pyłów mineralnych, wszystkie badane kruszywa zaklasyfikowano do najwyższej marki kruszywa [5]. Oznacza to, że w pierwszym przypadku nie została przekroczona zawartość 10%, a w drugim 1% (dla żwiru 1,5%). Najwyższą zawartość ziaren nieforemnych 8,3% określono dla granodiorytu uk (V), a w przypadku zawartości pyłów mineralnych 0,66% dla bazaltu uk (IV).

Podsumowując, wszystkie badane kruszywa w zakresie badanych właściwości, można sklasyfikować jako wysokiej jakości [5]. Wyjątek stanowi granit pl (I), sklasyfikowany do najniższej marki 20, ze względu na wynik badania wytrzymałości na miążdżenie.

3.2. Betony

Zgodnie z kryteriami zgodności określonymi w PN-EN 206-1:2003 [10] wszystkie badane betony sklasyfikowano do klasy wytrzymałości na ściskanie C30/37. Różnica w skrajnych wartościach średnich wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania pomiędzy betonami (BII) bazalt pl i B(III) granit uk, wynosi 12%. Po 365 dniach różnica zmniejszyła się do 9%, ale nie dotyczy już tych samych betonów. Większe zróżnicowanie stwierdzono w przypadku wytrzymałości na zginanie, pomiędzy największą (BII) i najmniejszą (BIII) wartością, jest to 19%. Najlepsze właściwości wytrzymałościowe stwierdzono w przypadku betonu z kruszywem bazaltowym polskim (II), wytrzymałość na ściskanie po 365 dniach wynosi 51,5 MPa, a na zginanie 5,20 MPa. Z kolei najmniejsze wartości wytrzymałości stwierdzono w przypadku betonu z kruszywem granitowym ukraińskim (III), odpowiednio na ściskanie 47,3 MPa i na zginanie 4,38 MPa (tab. 5).

Porównując wyniki badań wytrzymałościowych betonów wykonanych z odpowiednimi kruszywami polskimi i ukraińskimi, stwierdzono nieznacznie większe wartości w przypadku betonów z rodzimymi kruszywami. Beton BII (bazalt pl) ma wytrzymałość na ści-

skanie po 365 dniach o około 2% większą od betonu BIV (bazalt uk), a na zginanie o około 5%. Natomiast różnice wytrzymałości betonów z kruszywami granitowymi, betony BI (granit pl) oraz BIII (granit uk), wynoszą odpowiednio 8% i 13%, a w przypadku granodiorytu, betony BI (granit pl) oraz BV (granodioryt uk), odpowiednio 5% i 8%. Rozważając wyniki badań w przypadku porównawczego betonu BVI (żwir pl), osiągnięto porównywalne wytrzymałości (beton BIV bazalt uk) lub większe niż w przypadku kruszyw ukraińskich. Biorąc pod uwagę lepszą mechaniczną przyczepność zaczynu cementowego do kruszyw łamanych niż do owalnych i gładkich żwirowych, wyniki te wydają się dość zaskakujące. W tym miejscu należy dodatkowo podkreślić największy wśród wszystkich betonów przyrost (ponad 8 MPa, czyli blisko 20%) wytrzymałości do 365 dni. Tak dobre właściwości wytrzymałościowe betonu ze żwirem – szczególnie w wieku 1 roku – pozwala wyjaśnić skład mineralny jego ziaren. Jak wynika z badań przeprowadzonych za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej około połowy ziaren żwiru pochodziło ze skał węglanowych i zawierało kalcyt lub mieszaninę kalcytu i dolomitu. Natomiast minerały te w warstwie kontaktowej reagują w czasie z zaczynem, zwiększając przyczepność kruszywa do stwardniałego zaczynu [3, 11, 13].

Porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie i zginanie dla betonów wykonanych z poszczególnych kruszyw przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

4. Wnioski

Pomimo najniższej wytrzymałości na miążdżenie kruszywa granitowego z Siedlimowic k. Strzegomia stwierdzono lepsze charakterystyki wytrzymałościowe betonów w odniesieniu do porównywalnych petrograficznie kruszyw ukraińskich.

Porównując wyniki badań betonów, największe wartości uzyskano stosując kruszywo bazaltowe z kopalni Winna Góra, a najmniejsze stosując kruszywo granitowe z kopalni Vyrivskij Karjer (III). Mimo to, wszystkie betony zostały zaliczone do tej samej klasy wytrzymałości na ściskanie.

Wysoka wytrzymałość betonu z kruszywem żwirowym związana była z zawartością w nim ziaren ze skał węglanowych, zapewniających mocniejszą warstwę przejściową kruszywo-zaczyn.