

Właściwości kruszywa z różnych wapieni rozdrabnianych w kruszarce szczękowej

Properties of aggregates of various limestones produced in jaw crusher

1. Wstęp

Gęstość nasypowa materiałów ziarnistych o różnych kształtach ziaren jest nadal teoretycznym i praktycznym problemem badawczym, o szczególnym znaczeniu w technologii chemicznej (1–4). W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu rodzaju wapienia i budowy szczęk kruszarki na kształt ziaren oraz gęstość nasypową uzyskanego kruszywa. Badania przeprowadzono na frakcji ziarnowej wapieni, o wymiarach od 5,0 do 8,0 mm. Oznaczano właściwości kruszywa, między innymi gęstość nasypową, luźno usypanego kruszywa w cylindrze pomiarowym.

Wapienie rozdrabniano w dwóch kruszarkach szczękowych Universal, różniących się wykładzinami części roboczych. W doświadczeniach stosowano metody badawcze, zawarte w odpowiednich normach.

Celem przeprowadzonych doświadczeń było poszukiwanie wpływu rodzaju wapienia i kształtu szczęk kruszarek na właściwości rozdrobnionych ziaren oraz gęstości nasypowej uzyskanego kruszywa.

2. Opis doświadczeń

2.1. Właściwości wybranych wapieni

Do badań wybrano wapień dewoński ze złoża w Trzuskawicy, wapień dolnokarboński ze złoża w Czatkowicach i wapień górnej jury ze złoża w Bukowej. Wapienie te stosowane są do produkcji wapna palonego. Porowatość warstwy wsadu w szybowych piecach wapienniczych ma wpływ na zużycie ciepła i jakość produkowanego wapna palonego, będącego jednym z podstawowych produktów wykorzystywanych w budownictwie, w przemyśle chemicznym i hutniczym.

Właściwości wapieni wybranych do badań są szczegółowo opisane w pracy jednego z autorów (5). Wapień dewoński ma śladowe ilości

1. Introduction

The bulk density of materials composed of grains with various shape is continuously theoretical and practical research problem with a special meaning in chemical technology (1-4). In the paper the results of investigation of the impact of the kind of limestone and construction of crusher jaws on shape of the grains and bulk density of produced aggregate are presented. The limestones fraction 5,0 ÷ 8,0 mm was investigated. The properties of aggregate was examined, among other the bulk density of loosely heaped up aggregate in measuring vessel.

The limestone particles were produced using two half-industrial jaw crushers, Universal type, with different jaws. The experiment was carried up applying the methods of the tests described in the below mentioned standards.

The goal of experiments was to find effect of the limestone kind and the construction of the crusher jaws on the limestone aggregate properties and the shape of the produced grains.

2. Description of experiment

2.1. Properties of the chosen limestones

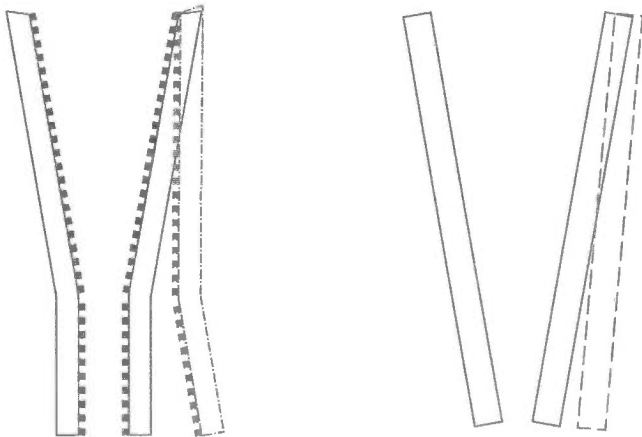
The Devonian limestone from the Trzuskawica deposit (the Devonian limestone), the Carboniferous limestone from the Czatkowice deposit (the Lower Carboniferous limestone) and the Jurassic limestone from the Bukowa deposit (the Middle Astartian limestone) were chosen for the tests. The limestones are used, among the other, for industrial production of quick lime. The charge layer porosity in the shaft furnaces for lime production has an essential impact on heat consumption and quality of produced lime, which is one of the basic products of chemical industry.

The properties of the limestones applied in the tests are described in detail in the paper of one of the authors (5). The results of chemi-

dolomitu i kwarcu, natomiast w wapieniu karbońskim zawarte jest około 98% kalcytu, około 1% dolomitu ankeritowego i około 1% kwarcu, a w wapieniu jurajskim zawartość kalcytu wynosi około 99%, a resztę stanowi kwarc. Porowatości całkowite wapienia dewońskiego i karbońskiego są zbliżone i wynoszą odpowiednio 1,4%, 0,7%. Porowatość całkowita wapienia jurajskiego bardzo różni się od tych wartości i wynosi około 16,1%.

2.2. Warunki rozdrabniania

Wapienie rozdrabniano w kruszarkach szczękowych z odgórnym podparciem różniących się kształtem i gładkością powierzchni roboczych szczęk, pokazanych schematycznie na rysunku 1. Wypukłość lub płaskość szczęk kruszarki mają wpływ na kształt rozdrobnionych ziaren. W kruszarkach szczękowych z wypukłą powierzchnią płyt roboczych materiał łatwiej i szybciej przemieszcza się w kierunku otworu wylotowego. Pokruszone ziarna są bardziej jednorodne pod względem kształtu i rozmiarów. Kruszarkę z rowkowanymi powierzchniami szczęk roboczych oznaczono jako „A”, a kruszarkę z płaskimi i gładkimi płytami powierzchni roboczych szczęk jako „B”.



Rys. 1. Schematy szczęk stosowanych kruszarek; pokazano skrajne położenia szczęki ruchomej: po lewej płyty rowkowanej (kruszarka A), po prawej płyty szczękowe gładkie (kruszarka B)

Fig. 1. The schemes of the crusher jaws applied for crushing of limestones; extreme positions of the moving jaws are shown: on the left jaw with grooved surface (crusher A), on the right smooth jaw plates (crusher B)

2.3. Wyniki doświadczeń

Schemat wykonanych badań właściwości kruszyw w eksperymencie jest pokazany na rysunku 2. W artykule wykorzystano wyniki doświadczeń zawarte w pracy magisterskiej P. Szostaka, wykonanej w roku 2012.

Z wapienia kawałkowego frakcji 40 – 80 mm otrzymywano kruszywo po rozdrobnieniu w kruszarkach A i B. Następnie z otrzymanego kruszywa wybrano frakcję o uziarnieniu 5,0 – 8,0 mm przesiewając kruszywo przez zestaw sił badawczych o oczkach kwadratowych zgodnie z normą PN-EN 933-1. Przeprowadzono oznaczenie wskaźnika kształtu WK i oznaczenie wskaźnika płaskości WP dla wykazania różnic w kształcie ziarn kruszyw pochodzących z dwóch

cal analysis show big content of CaO over 55% and low content of admixtures. The Carboniferous contains 98% of calcite, about 1% of Ankeritic dolomite and about 1% of quartz. In Jurassic limestone the calcite content is over 99% and quartz about 1%. Porosities of Devonian and Carboniferous limestones were similar and equal 1.4% and 0.7% respectively. The porosity of Jurassic limestone is significantly higher, about 16%.

2.2. Limestones crushing

The limestones were produced using the jaw crushers with upper support and they differed of shape and smoothness of the jaw plates, schematically shown in Fig. 1. Convexity or flatness of the crusher jaws has the impact on the shape of the produced aggregate grains. The crushed material easier and faster moves towards the crusher outlet in the jaw crushers with convexity plates. The crushed grains are more homogenous considering the particles shape and size. The crusher with groove surface jaw plates is marked as the crusher “A”, and the crusher with smooth jaw plates is marked as the crusher “B” in the experiment.

2.3. Experimental

Figure 2 shows the scheme of the carried up tests of the aggregate properties. In the paper the results of Szostak master’s thesis are used.

The limestone fractions 40 – 80 mm were used for production of aggregate after crushing in the crushers A and B. Then from the produced aggregate the fraction 5.0 – 8.0 mm was chosen sieving the aggregate on the set of the tests screens with square meshes according to the standard PN-EN 933-1. Determinations of shape index SI and flakiness index FI to show the differences in the shape of the particles produced using the two different crushers were carried up. The indirect tests of the bulk density and the density of the limestone particles were applied for determination of granular skeleton aggregate voids.

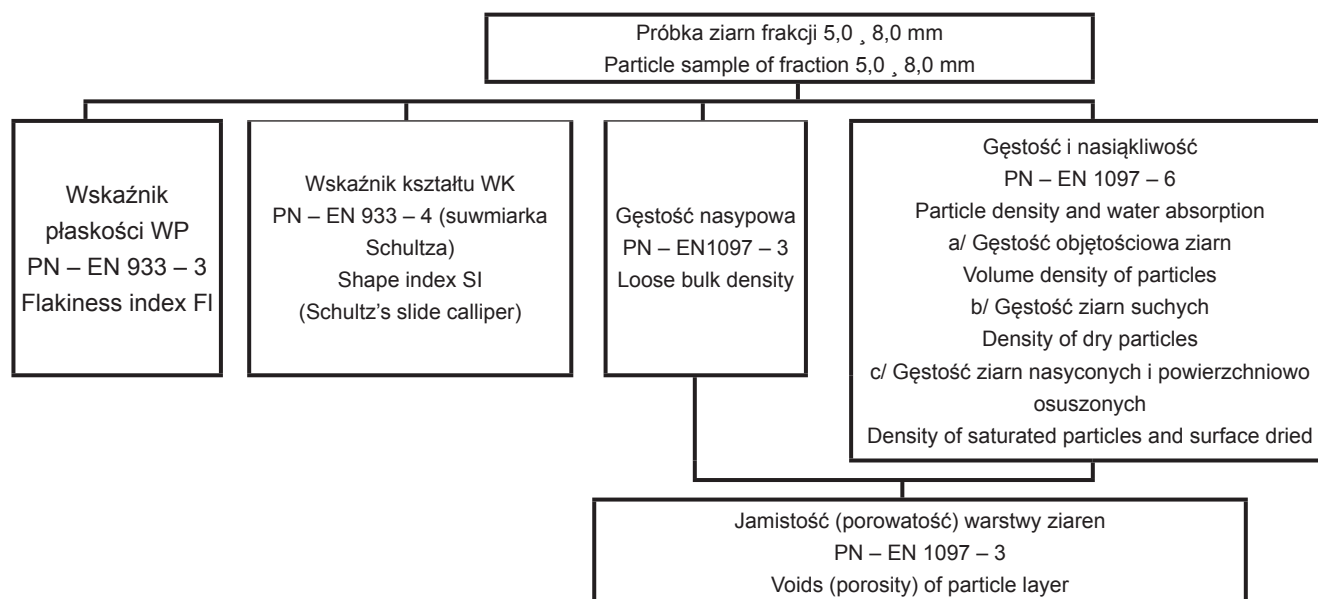
The applied investigation methods are described in the standards, primarily in PN-EN 12620 and PN-EN 13043, as well as PN-EN 933.

3. Results of experiments

3.1. The shape of particles measured using flakiness index FI and shape index SI

Table 1 shows of the measurement and calculation result examples for determination of flakiness index FI for the particles produced applying the Devonian limestones of the Trzuskawica deposit and the crusher A.

The symbols included in table 1 are: M_1 [g] is the sum of the mass of the particle fraction d_i/D_i , it means the particles which are sieved through the screen with bigger wholes (D_i) and remain on a screen with the smaller mesh (d_i), M_2 [g] is the sum of the mass of the particle fractions which are sieved through the appropriate screens



Rys. 2. Schemat eksperymentu: wykonane oznaczenia właściwości kruszyw frakcji 5,0 + 8,0 mm

Fig. 2. Scheme of the tests of the aggregates properties of the fraction 5,0 + 8,0 mm

Tablica 1 / Table 1

WSKAŹNIK PŁASKOŚCI WP ZIAREN WAPIENIA ZE ZŁOŻA W TRZUSKAWICY ROZDRABNIANYCH W KRUSZARCE A, [NORMA EN 12620]

FLAKINESS INDEX FI OF THE LIMESTONE PARTICLES OF THE TRZUSKAWICA DEPOSIT PRODUCED IN CRUSHER A, STANDARD EN 12620

Masa próbki analitycznej Mass of analytical sample M_0		860 g		
Przesiewanie na sitach badawczych Sieving using testing screens *)		Przesiewanie na sitach prętowych / Sieving using rod screens		
Frakcja o wymiarach ziarn Fraction of particle sizes d/D_i [mm]	Masy (R_i) frakcji o wymiarach ziarn Mass of fraction of particle sizes d/D_i [g]	Nominalna szerokość szczeliny sita prętowego Nominal width of slit of rod screen [mm]	Masy przechodzące przez sito prętowe Mass sieving through rod screen (m_i) [g]	$FI_i = (m_i/R_i) * 100$
8/10	0	5	-	-
6,3/8	546	4	58	11
5/6,3	314	3,15	4	1
4/5	0	2,5	-	-
$M_1 = \sum R_i$	860	$M_2 = \sum m_i$	62	-
Wskaźnik płaskości/ Flakiness index: $FI = (M_2/M_1) \times 100 = 7$ (w zaokrągleniu do liczby całkowitej/ in rounding to whole number).				

*) – sita badawcze z otworami o boku kwadratowym zgodne z wymaganiami norm/ testing screens with squares mesh according to the standard requirements ISO 3310-1 i ISO 3310-2.

Tablica 2 / Table 2

WSKAŹNIKI PŁASKOŚCI WP ZIAREN WAPIENI W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU WAPIENIA I RODZAJU KRUSZARKI, NORMA EN 12620

FLAKINESS INDEX FI OF THE LIMESTONES PARTICLES DEPENDING ON KIND OF THE LIMESTONES AND TYPE OF THE CRUSHER, STANDARD EN 12620

Wapień pochodzący z: Limestone originating from:	Trzuskawica	Czatkowice	Bukowa
Kruszarka/ Crusher A	7	14	4
Kruszarka/ Crusher B	48	45	20

with the width of the slits equalling $D/2$, R_i [g] is the mass of the particle fraction with the sizes d/D_i , m_i [g] is the mass of the material of the same fraction d/D_i , which is sieved through the appropriate rod screen with the width of the slit equalling $D/2$.

The table 2 shows the flakiness index FI of the tested limestones particles depending on kind of the limestone and type of the crusher.

The shape of particle was also determined using Schultz's slide calliper according to the standard PN - EN 933 – 4. The length and the thickness were measured for each particle contained in the analytical sample. The particle length L it is the maximal distant of



Rys. 3. Przykład ziarna foremnego (po lewej) i nieforemnego (po prawej) wapienia dewońskiego, rozdrabnianego w kruszarce A.

Fig. 3. On the left the example of a shapely particle and on the right the example of a unshapely particle produced using the Devonian limestone using the crusher A.

Tablica 3 / Table 3

WSKAŹNIK KSZTAŁTU WK ZIAREN WAPIENIA ZE ZŁOŻA W TRZUSKAWICY OTRZYMANYCH PRZY UŻYCIU KRUSZARKI A, OZNACZONY PRZY UŻYCIU SUWMIARKI SCHULZA WEDŁUG NORMY PN-EN 933 – 4

SHAPE INDEX SI OF THE PARTICLES PRODUCED USING THE LIMESTONE OF THE TRZUSKAWICA DEPOSIT AND THE CRUSHER A, DETERMINED APPLYING SCHULTZ'S SLIDE CALLIPER, STANDARD PN-EN 933 – 4

Wskaźnik kształtu / Shape index SI	
Masa próbki analitycznej / Mass of analytical sample M_1 [g]	105
Masa ziarn foremnych / Mass of shapely particles [g]	99
Masa ziarn nieforemnych / Mass of unshapely particles M_2 [g]	6
Wskaźnik kształtu / Shape index SI % = $(M_2/M_1) \times 100$ (w zaokrągleniu do liczby całkowitej / in rounding to whole number)	6

różnych łamaczy. W celu określenia jamistości kruszyw wykonano badania pośrednie: gęstości nasypowej i gęstości ziarn.

W badaniach stosowano metody zawarte w odpowiednich normach: PN-EN 12620, a przede wszystkim PN-EN 13043 i PN-EN 933.

3. Wyniki doświadczeń

3.1. Kształt ziarn określony na podstawie wskaźników płaskości FI i kształtu SI

Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń przeprowadzonych w celu określenia wartości wskaźnika płaskości FI ziaren wapienia dewońskiego rozdrabnianego w kruszarce A są pokazane w tablicy 1.

Oznaczenia przyjęte w tablicy 1: M_1 [g] jest sumą mas frakcji o wymiarach ziarn d/D_i , czyli ziarn przechodzących przez sito o większych szczelinach (D_i) a zatrzymujących się na sicie o mniejszych szczelinach (d), M_2 [g] sumą mas frakcji o wymiarach ziarn przechodzących przez odpowiednie sita o szerokości szczeliny $D/2$, R_i [g] jest masą frakcji o wymiarach ziarn d/D_i , m_i [g] jest masą materiału z tej samej frakcji d/D_i , która przeszła przez odpowiednie sito prętowe o szerokości szczeliny $D/2$.

Tablica 4 / Table 4

WSKAŹNIKI KSZTAŁTU WK BADANYCH ZIAREN WAPIENI W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU WAPIENIA I RODZAJU KRUSZARKI, NORMA PN-EN 933 – 4.

THE SHAPE INDEXES SI OF THE TESTED PARTICLES DEPENDING ON KIND OF THE LIMESTONE AND TYPE OF THE CRUSHER, STANDARD PN-EN 933 – 4.

Wapień pochodzący z: Limestone originating from:	Trzuskawica	Czatkowice	Bukowa
Kruszarka/Crusher A	6	13	2
Kruszarka/Crusher B	51	59	59

the two parallel planes, tangent to the surface of the particle. The particle thickness E is the minimal size of the particle determined by the maximal distant between the two parallel planes tangent to surface of the particle. The particles with ratio $L/E > 3$ are classifiable as the unshapely particles.

Table 3 shows the example of the measurement and calculation results for determination of shape index SI for the particles produced using the limestone of the Trzuskawica deposit and applying the crusher A.

Table 4 shows shape index SI of the tested limestones particles, depending on kind of the limestone and type of the crusher.

On Fig. 3 a shapely particle and unshapely particle, obtained applying the Devonian limestone of the Trzuskawica deposit and the crusher A, are shown.

Tablica 5 / Table 5

GĘSTOŚĆ NASYPOWA [$Mg \times m^{-3}$] W STANIE LUŻNYM WARSTWY ZIAREN WAPIENI, NORMA PN – EN 1097 – 3

BULK DENSITY [$Mg \times m^{-3}$] OF LIMESTONE LOOSE LAYER, STANDARD PN – EN 1097 – 3

Wapień pochodzący z: Limestone originating from:	Trzuskawica	Czatkowice	Bukowa
Kruszarka/Crusher A	1,39	1,38	1,23
Kruszarka/Crusher B	1,16	1,14	1,05

Wartości wskaźnika płaskości WP badanych ziaren wapieni w zależności od rodzaju wapienia i rodzaju kruszarki zestawiono w tablicy 2.

Kształt ziaren określono również przy użyciu suwmiarki Schultza według normy PN - EN 933 – 4. Zmierzono długość L i grubość E każdego ziarna, z próbki analitycznej. Długość ziarna L to największa odległość dzieląca dwie równoległe płaszczyzny styczne do powierzchni ziarna. Grubość ziarna E to minimalny wymiar ziarna określony przez największą odległość dzielącą dwie równoległe płaszczyzny styczne do powierzchni ziarna. Ziarna o stosunku wymiarów L/E > 3 są klasyfikowane jako nieforemne.

Przykładowe wyniki pomiarów i obliczeń do określenia wartości wskaźnika kształtu WK dla ziaren otrzymanych z wapienia dewońskiego przy użyciu kruszarki A są pokazane w tablicy 3.

Wskaźniki kształtu WK badanych ziaren w zależności od rodzaju wapienia i rodzaju kruszarki zestawiono w tablicy 4.

Na rysunku 3 pokazano ziarno foremne i nieforemne wapienia dewońskiego, po rozdrobnieniu w kruszarce A.

3.2. Gęstość nasykowa warstwy ziaren

Gęstość nasywową warstwy ziaren wapieni oznaczano według normy PN – EN 1097 – 3 (tablicy 5).

3.3. Jamistość i nasiąkliwość stosu okruszowego

Jamistość stosu okruszowego wapienia oznaczono zgodnie z normą PN – EN 1097 – 3. Jamistość v jest objętością wolnych przestrzeni w warstwie ziaren kruszywa, w stanie luźno usypanym.

Nasiąkliwość kruszywa wapiennego oznaczano według normy PN – EN 1097 – 6.

Wyniki obliczeń gęstości ziaren kruszywa, niezbędnych do oznaczenia jamistości, zaokrąglano do 0,01 Mg/m³, a nasiąkliwości zaokrąglano do 0,1 %.

Wyniki pomiarów jamistości, w zależności od rodzaju wapienia i zastosowanej kruszarki zestawiono w tablicy 6.

Wyniki pomiarów nasiąkliwości kruszywa wapiennego, w zależności od rodzaju wapienia i rodzaju kruszarki, zestawiono w tablicy 7.

Tablica 6 / Table 6

JAMISTOŚĆ [%] WARSTWY ZIAREN WAPIENIA W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU WAPIENIA I RODZAJU KRUSZARKI, NORMA PN – EN 1097 – 3

VOIDS [%] OF LIMESTONE PARTICLE LAYER DEPENDING ON KIND OF THE LIMESTONE AND TYPE OF THE CRUSHER, STANDARD PN – EN 1097 – 3

Wapień pochodzący z: Limestone originating from:	Trzuskawica	Czatkowice	Bukowa
Kruszarka/Crusher A	48,4	48,6	45,6
Kruszarka/Crusher B	56,6	57,1	52,3

3.2. Bulk density of particle layer

Bulk density of limestone particles layer is determined according to the standard PN – EN 1097 – 3. Table 5 shows the results of the determination.

3.3. Gaps of granular skeleton of aggregate and its absorbability

The voids of aggregate granular skeleton was determined according to the standard PN-EN 1097-3. The voids are the volume of free space in the loose aggregate layer, filling the cylinder. The absorbability was tested according to PN-EN 1097-6.

The results of aggregate particle density calculation are in rounding to 0,01 Mg/m³, and the calculation results of water absorption are in rounding to 0,1 %. Table 6 shows the calculation results of voids of particle layer depending on kind of the limestone and the crusher used.

Table 7 shows calculation results of water absorption of limestone particles depending on kind of the limestone and type of the crusher.

4. Discussion of the experiments

The values of flakiness index FI of the tested limestone particles included in table 2 show significant impact of kind of the jaws crusher on the results. The limestone particle samples obtained using the crusher B with the smooth jaw plates contain greater number of flat particles in comparison with the number of the remaining particles in the sample. It should be also mentioned, that the samples of the particles produced from the limestone of the Bukowa deposit contain less number of unshapely particles. Similar conclusions may be drawn from the values of shape index SI, which are shown in table 4. Probably the less number of flat or unshapely particles in the particle sample of the Jurassic limestone of the Bukowa deposit is caused by micrite, which is fine microcrystalline calcite contained in Carboniferous rock.

Table 5 shows loose bulk densities of the limestone aggregate depending on kind of the limestone and type of the crusher used. Bulk density of the loose layers of the limestone aggregate pro-

Tablica 7 / Table 7

NASIĄKLIWOŚĆ [%] KRUSZYWA WAPIENNEGO W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU WAPIENIA I RODZAJU KRUSZARKI, NORMA PN – EN 1097 – 6

WATER ABSORPTION [%] OF LIMESTONE AGGREGATE DEPENDING ON KIND OF THE LIMESTONE AND TYPE OF THE CRUSHER, STANDARD PN – EN 1097 – 6

Wapień pochodzący z: Limestone originating from:	Trzuskawica	Czatkowice	Bukowa
Kruszarka/Crusher A	0,4	0,4	7,4
Kruszarka/Crusher B	0,8	0,9	8,8

4. Dyskusja wyników pomiarów

Wartości wskaźnika płaskości WP ziaren wapieni zawarte w tablicy 2 wskazują na znaczny wpływ kształtu szczęk kruszarki na jego wartość. Próbki ziaren wapieni rozdrobnionych w kruszarce B z gładkimi płytami szczękowymi zawierają większą liczbę ziaren płaskich w stosunku do liczby pozostałych ziaren w próbce. Zauważa się również, że próbki ziaren wapienia jurajskiego na ogół zawierają mniej ziaren nieforemnych (tablica 4). Przypuszczalnie powodem mniejszej liczby ziaren płaskich czy nieforemnych w próbce kruszywa z wapienia jurajskiego jest mikryt, będący drobnoziarnistą skałą węglanową.

Gęstości nasypowe kruszywa wapiennego luźno usypanego [tablica 5], rozdrabnianego w kruszarce A o rowkowanej powierzchni szczęk, są większe w porównaniu z gęstościami kruszywa z kruszarki B. Uzyskane wyniki pokazują również mniejszą gęstość nasypową kruszywa uzyskanego z wapienia jurajskiego, w porównaniu z pozostałymi wapieniami. Nie można wykluczyć, że na ten wynik ma wpływ bardziej nieregularna powierzchnia ziaren wapienia jurajskiego.

Jamistość stosu okruszowego kruszyw wapiennych [tablica 6] zależy również od rodzaju zastosowanej kruszarki oraz mikrostruktury wapienia. Kruszywo rozdrabniane w kruszarce A, o rowkowanej powierzchni szczęk, ma mniejszą jamistość w porównaniu z kruszywem uzyskanym w kruszarce B, o gładkiej powierzchni szczęk. Również mikrytowa tekstura wapienia może być prawdopodobną przyczyną mniejszej jamistości kruszywa w porównaniu z kruszywem z wapieni dewońskich i karbońskich. Wapienie dewoński i karboński mają podobną teksturę, złożoną z dużych kryształów kalcytu, jednak o dużej zmienności ich wymiarów.

Nasiąkliwość kruszywa wapiennego [tablica 7] zależy również od rodzaju zastosowanej kruszarki jak i tekstury, a przede wszystkim porowatości wapienia. Kruszywo rozdrabniane w kruszarce A, o rowkowanej powierzchni szczęk, mają mniejszą nasiąkliwość w porównaniu z kruszywem wytworzonym w kruszarce B i to niezależnie od rodzaju wapienia. Natomiast wapień jurajski ma o rząd wielkości większą nasiąkliwość w porównaniu z wapieniami dewońskim i karbońskim. Wynika to z niewielkiej porowatości obu tych wapieni (5,6).

5. Wnioski

Uzyskane wyniki doświadczeń pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. wskaźniki płaskości WP i kształtu WK wykazują, że pochodzenie wapienia oraz rodzaj powierzchni szczęk kruszarki mają wpływ na płaskość oraz kształt ziaren, a także na udział ziaren nieforemnych,
2. obok wpływu kształtu powierzchni szczęk kruszarek ziarna otrzymane z wapienia jurajskiego mają kształt zbliżony do regularnego, co wiąże się prawdopodobnie z jednorodną teksturą tego wapienia i niewielkimi wymiarami kalcytu,

duced with crusher A with groove surface of the jaw plates are greater in comparison with bulk densities of the layers obtained with particles produced using the crusher B. Table 5 also shows the difference of bulk density of aggregate composed of the Jurassic limestone of the Bukowa deposit in comparison with the remaining tested limestones. Probably the dependence is linked with the different state of surface of particles produced in the case of Jurassic limestone of the Bukowa deposit in comparison with the remaining limestones.

Voids of limestone aggregate granular skeleton [table 6] depends also on the type of the crusher applied and the microstructure of limestone. The aggregate produced with application of the crusher A with groove surface of the jaw are giving lower voids in comparison with the results obtained for aggregate produced with crusher B, with smooth jaw plates. Also the micrite microstructure of the limestone can be a probably the reason of lower granular skeleton voids in comparison with the Devonian and Carboniferous limestones. These limestones have similar texture composed of large calcite crystals, however of the sizes variable.

Water absorption of limestone aggregate [table 7] depends also on kind of the crusher applied, but also of texture and primarily of limestone porosity. Water absorption of the particles produced using the crusher A with groove jaw plates is lower in comparison with the aggregate produced with the crusher B, independently of tested limestone. Water absorption of the Jurassic limestone is one order of value higher in comparison with water absorption of the Devonian and Carboniferous limestones. It is the result of low porosity of these limestones (5,6).

5. Conclusions

The following conclusions may be drawn taking into consideration the results of the experiments:

1. The values of flakiness index FI and shape index SI show the dependence of kind of the limestone and type of the jaw crusher used. Moreover they influence the fraction of shapely and unshapely particles too.
2. Apart from the type of the crusher jaw plates used the grains from Jurassic limestone have the shape similar to cubic, which is probably linked with the homogeneous texture of this limestone and small calcite crystals.
3. The bulk density of aggregate obtained of the Jurassic limestone is lower in comparison with bulk densities of the remaining limestones. The low apparent density of the Jurassic limestone in comparison with the remaining tested limestones and the differences in the surface properties of particles obtained from this limestone, are probably the cause of the observed differences in bulk density.
4. Voids of the granular skeleton of limestone aggregate, produced using the same crusher and prepared utilizing the fraction from 5.0 to 8.0 mm, do not differ in the case of the Devonian and Carboniferous limestones. Probable reason of

3. gęstość nasypowa kruszywa z wapienia jurajskiego jest mniejsza niż pozostałych wapieni. Mała gęstość pozorna wapienia jurajskiego w porównaniu z pozostałymi wapieniami oraz różnice we właściwościach powierzchni jego ziaren są prawdopodobną przyczyną występujących różnic gęstości nasypowej kruszywa,
4. jamistość stosu okruszowego kruszyw wapiennych rozdrabnianych w tej samej kruszarce, a utworzonych z frakcji od 5,0 do 8,0 mm nie różnią się w przypadku wapieni dewońskiego i karbońskiego. Prawdopodobną przyczyną są bardzo podobne właściwości oraz tekstura tych wapieni. Natomiast kruszywo z wapienia jurajskiego ma większą jamistość,
5. także nasiąkliwość kruszywa z wapienia jurajskiego jest znacznie większa w porównaniu z innymi wapieniami. Wynika to przede wszystkim z dużej porowatości tego wapienia,
6. jamistość stosu okruszowego kruszyw wapiennych zależy od rodzaju wapienia oraz rodzaju powierzchni szczęk kruszarki użytej do rozdrabniania.

Podziękowania

Autorzy dziękują Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za sfinansowanie niniejszej pracy z grantu zarejestrowanego w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie pod nr 18.18.160.977.

Podziękowania składamy również Panu Dyrektorowi dr inż. Henrykowi Szelałowi za umożliwienie wykonania doświadczeń w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie.

Literatura / References

1. D. J. Cumberland, R. J. Crawford, The packing of particles, pp. 99 – 118, Elsevier, Amsterdam 1987.
2. C. C. Furnas, Grading aggregates I Mathematical relations for beds for broken solids for maximum density, Ind. Eng. Chem., **23**, 9, 1052 – 1058 (1931).
3. K. Karlsson, L. Spring, Packing of irregular particles, J. Mat. Sci., **5**, 340 – 344 (1970).
4. Z. Naziemiec, Wpływ kształtu powierzchni płyt roboczych w kruszarkach szczękowych na skład ziarnowy i kształt ziaren produktów, Praca doktorska, AGH, Kraków 2006.
5. R. Lech, Właściwości wapieni i produktu ich dysocjacji termicznej. Część I Wapnie, Cement Wapno Beton, **78**, 3, 148 – 160 (2011).
6. R. Lech, Właściwości wapieni i produktu ich dysocjacji termicznej. Część II Wapno, Cement Wapno Beton, **79**, 6, 390 – 400 (2012).

these results arises from the very similar properties of these limestones such as: porosity, the size of calcite crystals.

5. The absorbability of aggregate from Jurassic limestone is significant higher in comparison with two other limestones. It results from the high total porosity of this limestone.
6. The voids of granular skeleton of limestone aggregates are depending on the kind of limestone and the type of crusher (A or B) used in their production.

Acknowledgement

We thank Polish Ministry of Science and Higher Education for financial support in the form of grant recorded in AGH University of Science and Technology under the registration number 18.18.160.977.

Moreover we thank Director Henryk Szelał Ph.D. for permission of carry up of the experiment in Institute of Ceramics and Building Materials in Glass and Building Materials Division in Cracow.