

Tymoteusz ZYDRÓN

Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego, Akademia Rolnicza w Krakowie
Department of Soil Mechanic and Earth Structures, Agricultural University of Cracov

Badania parametrów zagęszczalności przepalonych odpadów powęglowych z kopalni „Wesoła”

Investigation of the compactibility parameters of burnt colliery spoils from “Wesoła” mine

Słowa kluczowe: odpady powęglowe, parametry zagęszczalności

Key words: colliery spoils, compactibility parameters

Wprowadzenie

W wyniku przemysłowej działalności człowieka wytwarza się corocznie ogromne ilości odpadów poprodukcyjnych, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla środowiska przyrodniczego, a także ograniczają gospodarcze i przemysłowe wykorzystanie obszarów produkcyjnych. Według szacunków GUS-u w 2004 roku wytworzono 124 mln ton odpadów przemysłowych, wśród których około 37 mln ton stanowiły odpady powstające przy wydobyciu węgla kamiennego. Znaczna ich ilość została zagospodarowana (35 mln ton), a pozostała część została unieszkodliwiona lub jest składowana tymczasowo. Duże zagrożenie dla środowiska przyrodniczego stanowią odpady pogórnice

nagromadzone na zwałowiskach zakładów, których ilość szacowana jest na ponad 548 mln ton. Najlepsze warunki wykorzystania dużej ilości odpadów powęglowych stwarza budownictwo ziemne, gdzie od wielu lat materiały te są z powodzeniem stosowane do wznoszenia nasypów komunikacyjnych i hydrotechnicznych oraz w rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł (Skarżyńska 1993, 1997, Kawalec 1998).

Zastosowanie gruboziarnistych gruntów antropogenicznych do celów inżynierskich związane jest z koniecznością znajomości ich właściwości geotechnicznych. Z uwagi na zróżnicowane właściwości geotechniczne odpadów powęglowych, wynikające z pochodzenia stratygraficznego, technologii wydobycia, okresu składowania, różnej podatności na procesy wietrzenia oraz dezintegracji mechanicznej, wymagają one każdorazowo określenia ich parametrów fizycznych i mechanicznych. Najpowszechniej stosowaną miarą oceny jako-

ści formowanych budowli ziemnych jest wskaźnik zagęszczenia, stąd też ważnym zagadnieniem jest właściwe rozpoznanie parametrów zagęszczalności gruntów przewidywanych do wbudowania we wszelkiego typu budowle ziemne.

Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu uziarnienia, energii zagęszczania oraz wielkości cylindra na wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej przepalonych odpadów powęglowych z kopalni „Wesoła”.

Podstawowym problemem badawczym przy oznaczaniu właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów o dużej zawartości frakcji grubych jest dobór aparatury umożliwiającej prowadzenie badań na materiale o uziarnieniu naturalnym lub najbardziej do niego zbliżonym. Przyjmuje się, że oznaczanie parametrów geotechnicznych gruntów gruboziarnistych powinno wykonywać się w aparaturze, która spełnia następujący warunek (Wiłun 2003):

$$D = H = 5d_{90}$$

gdzie:

D – średnica wewnętrzna cylindra aparatu,

H – wysokość wewnętrzna cylindra aparatu,

d_{90} – średnice ziaren lub cząstek, których zawartość wraz z mniejszymi w gruncie wynosi 90%.

Zgodnie z podanym wyżej warunkiem oznaczenie parametrów zagęszczalności przeprowadzono metodą ubijania w aparatach Proctora: standardowym

o objętości cylindra $2,2 \text{ dm}^3$ i średnicy 150 mm oraz średniowymiarowym o objętości cylindra $9,8 \text{ dm}^3$ i średnicy 250 mm. Badania wykonano na materiale o uziarnieniu naturalnym ($d_{\max} < 100 \text{ mm}$) oraz na wyselekcjonowanych frakcjach o maksymalnej średnicy ziaren $d_{\max} < 60, 40, 20$ i 10 mm . Zagęszczanie próbek prowadzono przy energii standardowej ($E_Z = 0,59 \text{ J/cm}^3$) i zmodyfikowanej ($E_Z = 2,65 \text{ J/cm}^3$).

Charakterystyka materiału

Badania wykonano na przepalonych odpadach powęglowych pochodzących z przyzakładowego zwałowiska kopalni „Wesoła” w Mysłowicach (tab. 1).

Według nomenklatury geotechnicznej (PN-86/B-02480), uziarnienie odpadów powęglowych, niezależnie od wielkości badanej frakcji, odpowiada bardzo różnoziarnistym żwirom gliniastym. W materiale wyselekcjonowanych frakcji dominują ziarna grube odpowiadające frakcji kamienistej i żwirowej, których łączna zawartość wyniosła od 50 do 73%. Przy ocenie przydatności gruntów do celów drogowych (PN-S-02205:1998) istotna jest zawartość frakcji drobnych. Zawartość cząstek mniejszych niż $0,075 \text{ mm}$ w badanych frakcjach odpadów powęglowych jest w większości przypadków mniejsza od 15%, co kwalifikuje materiał na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania. Z kolei, uwzględniając zawartość cząstek drobniejszych od $0,02 \text{ mm}$, badane odpady powęglowe należy uznać jako wątpliwe lub wysadzinowe.

Gęstość właściwa odpadów powęglowych określona w piknometrze jest

TABELA 1. Skład granulometryczny odpadów powęglowych
TABLE 1. Grain size distribution of colliery soils tested

| Parametry Parameters | Uziarnienie materiału wyjściowego, d_{\max} [mm] Grain size distribution, | | | | |
|---|--|------|------|------|------|
| | 100 | 60 | 40 | 20 | 10 |
| Zawartość frakcji Fraction content [%]: | | | | | |
| • kamienistej / cobbles, f_k | 15,3 | 9,0 | – | – | – |
| • żwirowej / gravel, f_z | 57,7 | 62,0 | 68,2 | 59,3 | 50,0 |
| • piaskowej / sand, f_p | 19,3 | 20,8 | 22,8 | 29,2 | 35,9 |
| • pyłowej / silt, f_π | 5,3 | 5,7 | 6,3 | 8,0 | 9,4 |
| • ilowej / clay, f_i | 2,4 | 2,5 | 2,7 | 3,5 | 4,7 |
| Ilość nadziarna Coarser content, x [%] | – | 6,8 | 15,3 | 33,7 | 46,1 |
| Zawartość cząstek Particle content [%]: | | | | | |
| • $\leq 0,075$ mm | 9 | 10 | 11 | 13 | 17 |
| • $\leq 0,02$ mm | 6,5 | 7 | 7,5 | 10 | 12 |
| Średnica zastępcza Effective grain size, d_{90} [mm] | 50 | 40 | 30 | 13 | 8 |
| Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient, C_u [-] | 150 | 122 | 126 | 275 | 320 |
| Wskaźnik krzywizny Coefficient of curvature, C_c [-] | 4,9 | 4,0 | 4,7 | 5,8 | 5,0 |

stosunkowo duża ($2,68 \text{ g/cm}^3$) i odpowiada wartościom podawanym dla naturalnych gruntów mineralnych (Wiłun 2003).

Nasiąkliwość wagową oznaczono na 28 próbkach okruszków skalnych, wahała się ona od 1,5 do 8%, wynosząc średnio 5,1%.

Wyniki badań i ich analiza

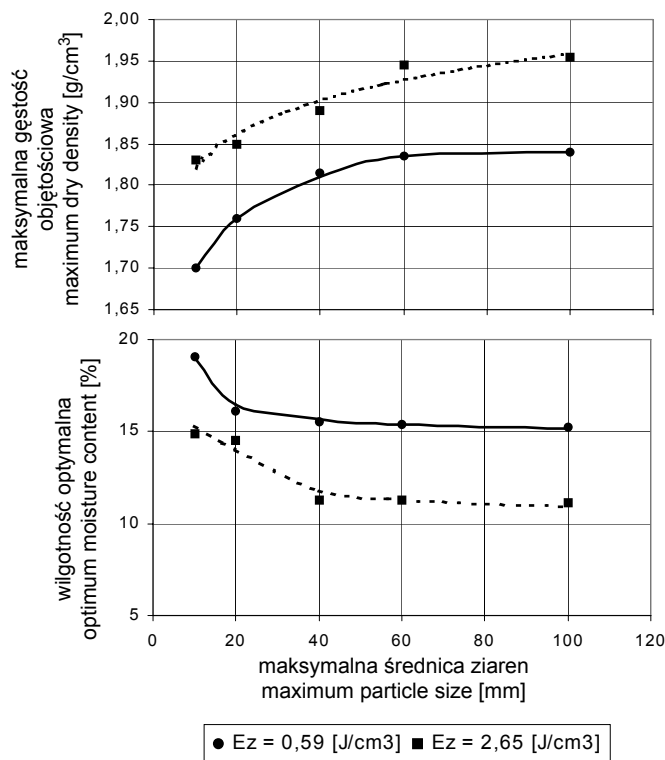
Wyniki badań maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej odpadów powęglowych przedstawiono w tabeli 2. Ogólnie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu były duże, pozwalające zakwalifikować badany materiał do górnych i dolnych warstw nasypów drogowych

(PN-S-02205:1998). Wartości wilgotności optymalnej wyniosły 15–19%, są one typowe dla odpadów powęglowych zalegających na wieloletnich zwalowskach (Kawalec 1973, Słupski i Stańczyk 1980). Analizując uzyskane wartości parametrów zagęszczalności, należy zwrócić uwagę na ich rozrzut, wynikający z uziarnienia materiału oraz zastosowanej metody badań.

Wpływ uziarnienia na parametry zagęszczalności określono na podstawie zmian wartości ρ_{ds} i w_{opt} uzyskanych dla frakcji $d_{\max} < 100$, $d_{\max} < 60$ i $d_{\max} < 40$ mm, badanych w aparaturze średniowymiarowej, oraz frakcji $d_{\max} < 20$ i $d_{\max} < 10$ mm, badanych w aparaturze standardowej, przy czym opisane zależności analizowano oddzielnie dla dwóch energii zagęszczania (rys. 1).

TABELA 2. Zestawienie wyników badań parametrów zagęszczalności
 TABLE 2. Results of compactibility parameters test

| Uziarnienie d_{\max} [mm] Granulation | Aparat Apparatus | Energia zagęszczania / Compaction energy | | | |
|---|---------------------------------|---|---|---|---|
| | | standardowa / standard [0,59 J/cm ³] | | zmodyfikowana / modified 2,65 [J/cm ³] | |
| | | Parametry zagęszczalności / Compactibility parameters | | | |
| | | maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [g/cm ³] maximum dry density | wilgotność optymalna w_{opt} [%] optimum moisture content | maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} [g/cm ³] maximum dry density | wilgotność optymalna w_{opt} [%] optimum moisture content |
| 100 | średniowymiarowy middle size | 1,840 | 15,25 | 1,955 | 11,10 |
| 60 | | 1,835 | 15,40 | 1,945 | 11,25 |
| 40 | | 1,815 | 15,50 | 1,890 | 11,30 |
| 40 | standardowy standard | 1,770 | 15,6 | 1,850 | 11,40 |
| 20 | | 1,760 | 16,10 | 1,850 | 14,50 |
| 10 | | 1,700 | 19,05 | 1,830 | 14,90 |



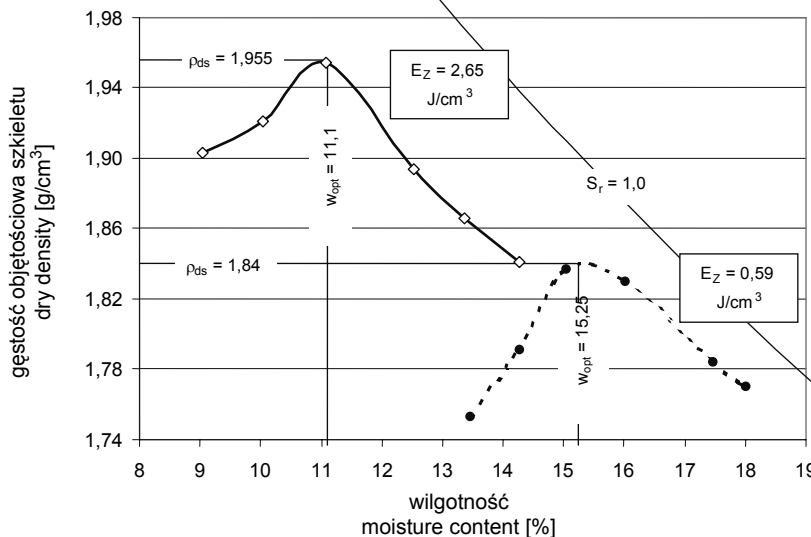
RYSUNEK 1. Zależność ρ_{ds} i w_{opt} odpadów powęglowych od maksymalnej średnicy ziarna
 FIGURE 1. Compactibility parameters of colliery spoils versus maximum particle size of soil tested

Stwierdzono, że wraz ze wzrostem maksymalnej średnicy ziarna (d_{\max}) wzrasta maksymalna gęstość objętościowa szkieletu i maleje wilgotność optymalna (rys. 1) zarówno przy standardowej, jak i zmodyfikowanej energii zagęszczenia. Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu uzyskane dla materiału o naturalnym uziarnieniu ($d_{\max} < 100$ mm) są o 0,13–0,14 g/cm³ (7–8% względnych) większe, a wartości wilgotności optymalnej o 3,8% (20–26% względnych) mniejsze w stosunku do odpowiednich wartości tych parametrów uzyskanych dla frakcji $d_{\max} < 10$ mm. Należy zwrócić uwagę, że wielkość zmian wartości parametrów zagęszczalności jest nieznaczna w przedziale maksymalnej średnicy ziarna (d_{\max}) od 40 do 100 mm, gdzie ilość odsianego nadziarna nie przekraczała 20% (por. tab. 1).

Wpływ średnicy cylindra aparatu na parametry zagęszczalności analizowano,

porównując wyniki badań otrzymane dla frakcji $d_{\max} < 40$ mm w standardowym i średniowymiarowym aparacie Proctora, które wykonano zarówno przy standardowej, jak i zmodyfikowanej energii zagęszczenia (tab. 2). Ogólnie w aparacie średniowymiarowym uzyskano większe o 0,04 g/cm³ wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu w odniesieniu do odpowiednich wartości tego parametru otrzymanych w aparaturze standardowej. Różnica ta wynika zapewne z różnego stosunku $\phi_{\text{cyl}}/d_{\max}$, który w aparacie standardowym wynosi 3,8, a w średniowymiarowym 6,2. Z kolei wpływ średnicy cylindra aparatu na wartości wilgotności optymalnej był nieznaczny, tzn. różnica otrzymanych wartości w_{opt} nie przekracza 0,1%.

Wyniki badań wpływu zastosowanej energii zagęszczenia na wartości parametrów zagęszczalności (rys. 2 i tab. 2) potwierdziły ogólną zależność, według



RYSUNEK 2. Wpływ energii zagęszczenia na parametry zagęszczalności odpadów powęglowych o naturalnym uziarnieniu ($d_{\max} < 100$ mm)

FIGURE 2. The influence of energy compaction on compactibility parameters of colliery spoils at natural granulation ($d_{\max} < 100$ mm)

której wzrost jednostkowej energii zagęszczenia wpływa na zwiększenie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz zmniejszenie wartości wilgotności optymalnej zarówno gruntów spoistych, jak i niespoistych (Pisarczyk 1977, Wiłun 2003). Dla badanych odpadów powęglowych podczas ich zagęszczania przy zmodyfikowanej energii zagęszczania uzyskano wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu większe o 0,09–0,13 g/cm³ (co stanowi 4–8% względnych) oraz wartości wilgotności optymalnej mniejsze o 1,6–4,2% (10–27% względnych) w odniesieniu do odpowiednich wartości tych parametrów otrzymanych przy standardowej energii zagęszczania.

Z uwagi na fakt, że większość laboratoriów drogowych i badawczych nie dysponuje aparaturą średniowymiarową czy wielkowymiarową, badania dla gruntów gruboziarnistych prowadzi się najczęściej w aparaturze standardowej odsiewając grubsze frakcje, a uzyskane rezultaty parametrów zagęszczalności koryguje się wzorami empirycznymi Wilczyńskiego lub Flossa (Pisarczyk

1977, PN-86/B-02480). Jak wykazują publikacje (Kawalec 1973, Pisarczyk 1977), stosowalność wzorów empirycznych daje zadowalające rezultaty jedynie w przypadkach, gdy zawartość frakcji grubszej (odsianej) nie przekracza 25–30% ogólnej ilości ziaren. Innym sposobem określania parametrów zagęszczalności gruntów gruboziarnistych z badań w aparaturze standardowej na materiale o zredukowanym uziarnieniu jest korygowanie ich wartości współczynnikami η i r (Pisarczyk 1977). W tym przypadku wartości ρ_{ds} i w_{opt} otrzymane z aparatury standardowej przemnaża się przez współczynniki, odpowiednio η i r , które stanowią ustalony doświadczalnie stosunek wartości parametrów zagęszczalności z badań w aparaturze wielkowymiarowej do odpowiednich wartości tych parametrów otrzymanych w aparaturze standardowej (tab. 3).

Wartości współczynnika η dla oznaczania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wynoszą 1,07–1,08, a wartości współczynnika r dla oznaczania wilgotności optymalnej odpadów wynoszą średnio 0,77. Są one bardzo

TABELA 3. Porównawcze zestawienie wartości parametrów zagęszczalności otrzymanych z badań w średniowymiarowym i standardowym aparacie Proctora

TABLE 3. Comparison of compactibility parameters obtained from middle size and standard Proctor's apparatus

| Energia zagęszczenia E_z Compaction energy | Aparat średniowymiarowy Middle size apparatus | | Aparat standardowy Standard apparatus | | Stosunek wyników badań w aparacie średniowymiarowym i normowym Relationship between results obtained from middle size and standard apparatuses | |
|--|--|-----------|--|-----------|---|------|
| | Uziarnienie / Grain size distribution | | | | | |
| | $d_{max} < 100$ mm | | $d_{max} < 10$ mm | | | |
| | ρ_{ds} | w_{opt} | ρ_{ds} | w_{opt} | η | r |
| J/cm ³ | g/cm ³ | % | g/cm ³ | % | – | – |
| 0,59 | 1,84 | 15,25 | 1,70 | 19,05 | 1,08 | 0,80 |
| 2,65 | 1,955 | 11,1 | 1,83 | 14,9 | 1,07 | 0,74 |

zbliżone do podanych przez autora dla nieprzepalonych odpadów powęglowych (Zydroń 2004).

Zagęszczenie gruntów niespoistych jest wynikiem przemieszczania się ziaren gruntu względem siebie pod wpływem zastosowanej energii oraz kruszenia ziaren (Pisarczyk 2004). W przypadku odpadów powęglowych, które przeważnie cechują się zawartością słabych okruchów skalnych, proces zagęszczania oraz wietrzenie powodują wyraźne zmiany ich składu granulometrycznego, a skutki tych zmian wpływają również na inne parametry geotechniczne (Słupski i Stańczyk 1980). W związku z tym znajomość odporności odpadów powęglowych na rozdrobnienie mechaniczne pozwala przewidywać zachowanie się tych materiałów po wbudowaniu w budowlę ziemne. Wpływ zagęszczenia na zmiany składu granulometrycznego ba-

danych odpadów powęglowych przedstawia tabela 4.

Wyniki analiz zmian składu granulometrycznego badanych odpadów powęglowych nie wykazały intensywnego kruszenia. W trakcie zagęszczania przy zastosowaniu energii zmodyfikowanej nastąpiło niewielkie zmniejszenie zawartości frakcji kamienistej oraz żwirowej (po około 4%) w odniesieniu do składu uziarnienia przed zagęszczeniem, a ubytek frakcji grubych został zbilansowany nieznacznym przyrostem frakcji piaskowej (1%), pyłowej (4%) oraz ilowej (do 1,5%).

Wynikiem zmian składu granulometrycznego są również zmiany wartości innych parametrów uziarnienia, tzn. średnic zastępczych, wskaźników różnoziarnistości i krzywizny uziarnienia. Zmiany wielkości wybranych średnic zastępczych pod wpływem zagęszczania

TABELA 4. Zmiany składu granulometrycznego odpadów powęglowych pod wpływem zagęszczania
TABLE 4. Changes of granulation of colliery spoils after compaction test

| Parametry Parameters | Uziarnienie przed zagęszczeniem Granulation before compaction | Uziarnienie po zagęszczeniu Grain size distribution after compaction | |
|---|--|---|--------------------------------------|
| | | $E_z = 0,59$ [J/cm ³] | $E_z = 2,65$ [J/cm ³] |
| Zawartość frakcji Fraction content [%]: | | | |
| • kamienistej / cobbles, f_k | 15,3 | 12,2 | 12,0 |
| • żwirowej / gravel, f_z | 57,7 | 56,1 | 54,3 |
| • piaskowej / sand, f_p | 19,3 | 20,0 | 20,3 |
| • pyłowej / silt, f_p | 5,3 | 8,0 | 9,4 |
| • ilowej / clay, f_i | 2,4 | 3,7 | 4,0 |
| Średnice zastępcze Effective grain size [mm]: | | | |
| • d_{60} | 15,0 | 11,0 | 9,0 |
| • d_{30} | 2,7 | 1,8 | 1,6 |
| • d_{10} | 0,1 | 0,023 | 0,015 |
| Wskaźnik różnoziarnistości Uniformity coefficient, C_u [-] | 150,0 | 478,0 | 600,0 |
| Wskaźnik krzywizny Coefficient of curvature, C_c [-] | 4,9 | 12,8 | 19,0 |

wskazują, że przy mniejszej (standardowej) energii zagęszczania następuje wyraźne zmniejszenie wielkości średnic zastępczych, a dalsze zwiększenie energii zagęszczania powoduje stosunkowo niewielkie zmiany średnic zastępczych w stosunku do przyrostu energii zagęszczania. Ogólnie można stwierdzić, że dezintegracja mechaniczna w przepalonych odpadach powęglowych jest mniejsza niż w odpadach nieprzepalonych (Słupski i Stańczyk 1980, Zydroń 2003) i jest ona wynikiem przepalenia materiału na zwałowisku.

Wnioski

1. Przepalone odpady powęglowe z kopalni „Wesoła” charakteryzują się stosunkowo dużymi wartościami parametrów zagęszczalności zależnymi głównie od wielkości uziarnienia i energii zagęszczania. Wraz ze wzrostem zarówno wielkości uziarnienia, jak i energii zagęszczania zwiększa się maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, a zmniejsza się wilgotność optymalna.
2. Parametry zagęszczalności gruboziarnistych odpadów powęglowych powinno się ustalać na podstawie wyników badań w aparaturze średniowymiarowej przy stosowaniu standardowej energii zagęszczania z jednoczesnym zachowaniem odpowiedniej proporcji między średnicą cylindra aparatu a wielkością badanych frakcji, która powinna wynosić $d_{cyl} \geq 5d_{90}$.
3. W przypadku braku aparatury średniowymiarowej badania można wykonywać w aparaturze standardo-

wej, a uzyskane wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej należy przemnożyć przez współczynniki przeliczeniowe η i r . Dla odpadów powęglowych o podobnym pochodzeniu i składzie granulometrycznym jak odpady badane przez autora wynoszą one odpowiednio 1,07–1,08 oraz 0,77.

4. Ze względu na dobrą zagęszczalność i nieznaczną podatnością na kruszenie mechaniczne badane przepalone odpady powęglowe mogą być wykorzystywane jako substytut naturalnych gruntów mineralnych do warstw nawierzchni drogowych.

Literatura

- KAWALEC B. 1973: Właściwości fizyczne i mechaniczne odpadów kopalnianych jako gruntu budowlanego. Maszynopis. Rozprawa doktorska. Zakład Geotechniki, Politechnika Śląska, Gliwice.
- KAWALEC B. 1998: O możliwości stosowania odpadów kopalnianych do budowy nasypów dróg i autostrad. IV Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce: 49–56.
- PISARCZYK S. 1977: Zagęszczalność gruntów gruboziarnistych i kamienistych. Rozprawa habilitacyjna. Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska.
- PISARCZYK S. 2004: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- PN-86/B-02480: Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-S-02205:1998: Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- SKARŻYŃSKA K.M. 1993: Zastosowanie odpadów górnictwa węglowego do budowy wałów przeciwpowodziowych. Konferencja

Naukowo-Techniczna „Wpływ eksploatacji górniczej na problemy gospodarki wodnej w województwie katowickim”. RZGW w Katowicach: 36–46.

- SKARŻYŃSKA K.M. 1997: Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wydawnictwo AR, Kraków.
- SŁUPSKI W., STAŃCZYK M. 1980: Kopalniane materiały odpadowe w budownictwie drogowym. *Drogownictwo* 4: 122–127.
- WIŁUN Z. 2003: Zarys geotechniki. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- ZYDRON T. 2003: Wpływ uziarnienia i zagęszczenia gruntów antropogenicznych na ich parametry geotechniczne. Rozprawa doktorska. AR, Kraków.
- ZYDRON T. 2004: Zagęszczalność nieprzepalonych odpadów górnictwa węgla kamiennego w świetle badań laboratoryjnych. Zastosowanie odpadów przemysłowych i geosyntetyków w budownictwie ziemnym. Materiały Sesji Naukowej z okazji Jubileuszu 70-lecia Profesor Krystyny Skarżyńskiej. Wydawnictwo AR, Kraków: 167–176.

Summary

Investigation of the compactibility tests of burnt colliery spoils from “Wesoła” mine. The paper presents results of investigation carried out on compaction ability of coarse grained burnt colliery spoils from “Wesoła” mine. The work was aimed at determining the influence of granulation, compaction energy and diameter of Proctor’s apparatus mould on compactibility parameters of colliery spoils. Compactibility parameters were determined with the use of standard and middle-size Proctor’s apparatus at 2 compaction energies.

Author’s address:

Tymoteusz Zydrón
Akademia Rolnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji
Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwa Ziarnego
al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
Poland