

Tymoteusz Zydroń, Eugeniusz Zawisza*, Andrzej Macałka*, Piotr Jantos**

BADANIA PARAMETRÓW ZAGĘSZCZALNOŚCI GRUBOZIARNISTEGO KRUSZYWA Z ŻUŻLA WIELKOPIECOWEGO

1. Wprowadzenie

Rozwój przemysłu oraz konieczność ochrony środowiska przyrodniczego w wielu rejonach naszego kraju zmuszają do poszukiwań różnych kierunków utylizacji materiałów odpadowych. Duże możliwości racjonalnego wykorzystania odpadów przemysłowych stwarza budownictwo ziemne. W ostatnich latach można zauważyć wyraźny wzrost wykorzystania materiałów odpadowych, w tym odpadów hutniczych, do celu budownictwa drogowego.

Kontrola zagęszczenia gruntów w budowlach ziemnych prowadzona jest najczęściej w oparciu o wartości wskaźnika zagęszczenia, przy czym maksymalne możliwe do uzyskania zagęszczenie otrzymuje się z badań laboratoryjnych metodami ubijania w aparacie Proctora. Jak wykazują wyniki badań terenowych [8] i laboratoryjnych [3, 4], zagęszczanie gruntów niespoistych metodą wibracyjną pozwala często uzyskać większe zagęszczenie niż metodą ubijania, dlatego też celowe wydaje się prowadzenie badań porównawczych przy zastosowaniu wymienionych metod celem doboru odpowiedniej metody zagęszczania tego typu gruntów.

Przedmiotem niniejszej pracy są badania parametrów zagęszczalności gruboziarnistych odpadów hutniczych w aparacie Proctora oraz na stoliku wibracyjnym.

2. Cel i metody badań

Celem badań było określenie wpływu metody zagęszczania na wartości parametrów zagęszczalności kruszywa z żużla wielkopiecowego o uziarnieniu $0 \div 31,5$ mm, wytwarzanego przez firmę Sląg Recycling sp. z o.o. z odpadów huty Mittal Steel Poland, zalegającego na składowisku „Pleszów” w Krakowie — Nowej Hucie.

* Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Akademia Rolnicza, Kraków

Zagęszczanie kruszywa przeprowadzono dwiema metodami:

- ubijania — w standardowym i średniowym aparacie Proctora o objętości cylindra odpowiednio 2,2 dm³ ($h = 12$ cm, $d = 15$ cm) i 9,8 dm³ ($h = 25$ cm, $d = 20$ cm), stosując standardową ($E_Z = 0,59$ J · cm⁻³) oraz zmodyfikowaną ($E_Z = 2,65$ J · cm⁻³) energię zagęszczania. Zagęszczanie przeprowadzono przy zachowaniu procedury określonej w normie PN-88/B-04481 [7].
- wibracyjną — na stoliku wibracyjnym wyposażonym w cylinder o objętości 8,1 dm³ ($h = 23$ cm, $d = 20$ cm), stosując amplitudę i częstotliwość drgań stolika wynoszące odpowiednio 0,5 mm i 50 Hz. W pierwszym etapie badania prowadzono na próbkach o wilgotności: powietrzno suchej ($w = 3 \div 4\%$), odpowiadającej wilgotności optymalnej (ustalonej w średniowym aparacie Proctora przy energii standardowej: $w = 12 \div 13\%$) i mniejszej o 2 ÷ 3% od wilgotności optymalnej ($w = 9 \div 10\%$), zagęszczanych w jednej, dwóch lub trzech warstwach przy dwóch wielkościach obciążeń: 0,7 i 4,6 kPa do stabilizacji osiadań. W drugim etapie badania przeprowadzono na próbkach o wilgotności stopniowo zwiększanej o 1 ÷ 2%, od powietrzno suchej do wilgotności, przy której następowało wyraźne zmniejszanie się gęstości objętościowej, zagęszczanych w jednej warstwie przy obciążeniu 4,6 kPa.

3. Ogólna charakterystyka badanego materiału

W składzie granulometrycznym kruszywa dominujący udział miała frakcja żwirowa, której zawartość wynosiła ponad 70%, a zawartość frakcji drobnych, tj. pyłowej wraz z ilością, była nieznaczna i nie przekraczała 4% (tab. 1).

TABELA 1
Podstawowe właściwości fizyczne kruszywa z żużla wielkopiecowego

Parametr	Jednostka	Wartość parametru
Zawartość frakcji:		
– żwirowa 40–2 mm	%	74,4
– piaskowa 2–0,05 mm	%	22,4
– pyłowej z ilością < 0,05 mm	%	3,2
Nazwa wg PN-86/B-02480 [6]	–	Ż
Wskaźnik niejednorodności uziarnienia	–	40
Wskaźnik krzywizny uziarnienia	–	2,6
Gęstość właściwa	g · cm ⁻³	3,12
Nasiąkliwość wagowa	%	0,4 ÷ 9,0

Według klasyfikacji geotechnicznej [6] uziarnienie badanego materiału odpowiada bardzo różnoziarnistym żwirom. Według kryterium wartości wskaźnika krzywizny uziarnienia kruszywo można scharakteryzować jako materiał dobrze uziarniony. Gęstość właściwa była wyraźnie większa od wartości podawanych dla naturalnych gruntów mineralnych [9] o zbliżonym uziarnieniu. Wartości nasiąkliwości wagowej kruszywa mieściły się w przedziale od 0,4 do 9,0%, średnio 3,7%.

4. Wyniki badań i ich analiza

4.1. Metoda ubijania

Wartości parametrów zagęszczalności były stosunkowo duże (tab. 2) i mieściły się w przedziale wartości podawanym dla tego typu materiałów [9–13]. Istotny wpływ na wartości parametrów zagęszczalności posiada energia zagęszczania oraz wielkość średnicy cylindra aparatu. W aparacie średniowymiarowym uzyskano większe wartości zarówno maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu (o 3÷4% względnych), jak i wilgotności optymalnej (o 22÷30% względnych) od odpowiednich wartości otrzymanych w aparacie standardowym. Stosując zmodyfikowaną energię zagęszczania ($E_Z = 2,65 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$) uzyskano wyraźnie większe wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu (o 8÷9% względnych) i nieznacznie mniejsze wartości wilgotności optymalnej (o 0÷6% względnych) w stosunku do odpowiednich wartości uzyskanych przy energii standardowej ($E_Z = 0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$).

TABELA 2

Wyniki badań zagęszczalności kruszywa metodą ubijania

Parametr	Aparat			
	średniowymiarowy		normowy	
	Energia zagęszczania, $E_Z [\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}]$			
	0,59	2,65	0,59	2,65
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, $\rho_{ds} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	1,96	2,14	1,91	2,06
Wilgotność optymalna, $w_{\text{opt}} [\%]$	13,0	12,2	10,0	10,0

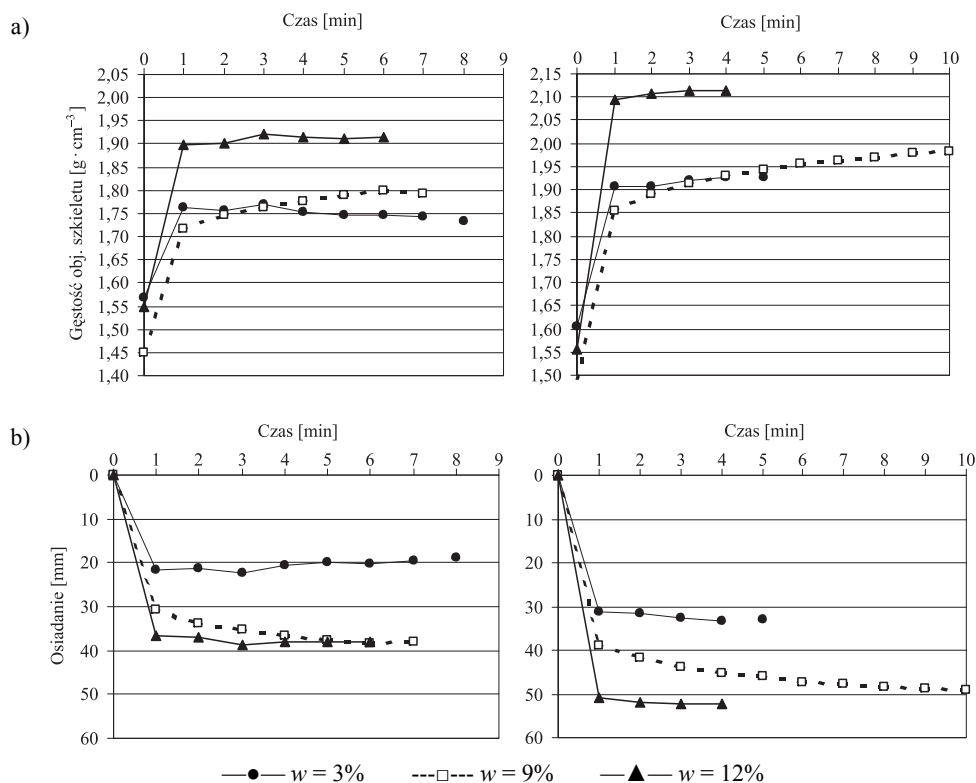
4.2. Metoda wibracyjna

Otrzymane w pierwszym etapie badań wyniki zagęszczania kruszywa w jednej warstwie wykazały, że:

- Czas stabilizacji osiadania próbek nie zależał istotnie od ich wilgotności (rys. 1). Najdłuższy czas uzyskano dla próbek o średniej wilgotności (9%), gdzie zarówno przy

obciążeniu 0,7, jak i 4,6 kPa stabilizacja osiadania nastąpiła odpowiednio po 6 i 10 minutach wibracji. Czas stabilizacji osiadań dla próbek o niskiej i wysokiej wilgotności (odpowiednio 3 i 12%) wynosił od 3 minut przy obciążeniu 0,7 kPa do 4 minut przy obciążeniu 4,6 kPa.

- Wraz ze wzrostem wilgotności próbek zwiększały się wartości ich gęstości objętościowej szkieletu.
- Największe przyrosty osiadań nastąpiły w początkowym okresie zagęszczania, wartości osiadań uzyskane po 1 minucie wibracji stanowiły 80-95% całkowitych osiadań poszczególnych próbek.



Rys. 1. Zależność osiadań (a) i gęstości objętościowej szkieletu (b) kruszywa od czasu wibracji

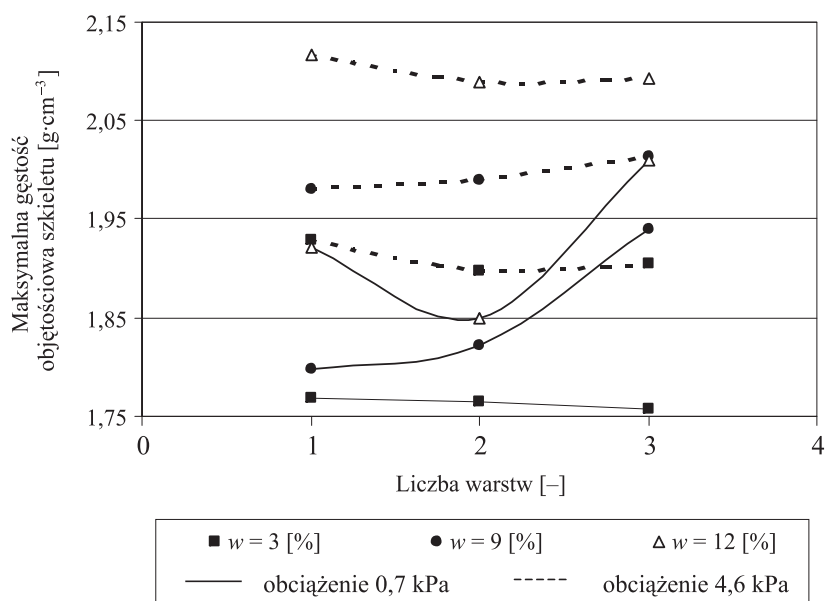
Przy zagęszczaniu kruszywa w dwóch i trzech warstwach przyjęto łączny czas wibracji wszystkich warstw taki sam jak przy zagęszczaniu w jednej warstwie. Uzyskane wyniki (rys. 2) wskazują, że:

- Przy obciążeniu 4,6 kPa największe wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu wykazało kruszywo o wilgotności 12% (zblizonej do optymalnej), mniejsze

o 4÷7% względnych kruszywo o wilgotności 9%, a najmniejsze (mniejsze o 10% względnych od zagęszczenia przy wilgotności 12%) kruszywo o wilgotności 3% (powietrzno-suchej). Przy każdej wilgotności wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu kruszywa zagęszczanego w dwóch lub trzech warstwach były zbliżone i nie odbiegały w sposób istotny od wartości tego parametru dla kruszywa zagęszczanego w jednej warstwie (rys. 2).

- Przy obciążeniu 0,7 kPa wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu były wyraźnie mniejsze niż przy obciążeniu 4,6 kPa: o 4÷12% względnych przy wilgotności 12%, o 4÷9% względnych przy wilgotności 9% i o 7÷8% względnych przy wilgotności 3%. Największe wartości omawianego parametru wykazało kruszywo o wilgotności zbliżonej do optymalnej, a najmniejsze o wilgotności powietrzno-suchej. Ponadto można zauważyć, że kruszywo o większej wilgotności ($w = 12$ i 9%) wykazało zwiększanie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu przy zwiększaniu liczby warstw (zmniejszaniu grubości zagęszczanych warstw), natomiast kruszywo o wilgotności powietrzno-suchej nie wykazało takiej zależności.

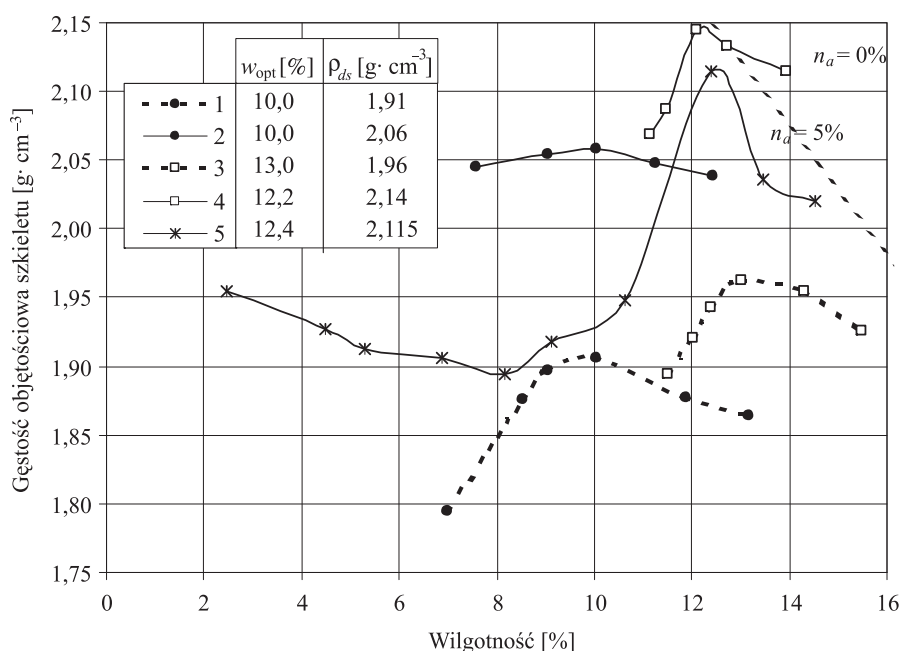
Przedstawione wyniki badań wskazują, że wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu zależały głównie od wilgotności kruszywa i wielkości obciążenia, natomiast praktycznie nie zależały od liczby (grubości) zagęszczanych warstw.



Rys. 2. Zależność gęstości objętościowej szkieletu kruszywa od liczby warstw i ich obciążenia

Na podstawie badań w pierwszym etapie ustalono, że największą wartość gęstości objętościowej szkieletu uzyskano dla kruszywa o wilgotności 12%, zagęszczanego w jednej

warstwie przy obciążeniu 4,6 kPa przez 4 minuty. Dlatego w drugim etapie badania przeprowadzono przy podanych powyżej parametrach, przyjętych jako optymalne przy wibracyjnym zagęszczaniu kruszywa.



Rys. 3. Wpływ metody zagęszczania na wartości parametrów zagęszczalności: 1 — standardowa metoda Proctora — aparat normowy, 2 — zmodyfikowana metoda Proctora — aparat normowy, 3 — standardowa metoda Proctora — aparat średniowymiarowy, 4 — zmodyfikowana metoda Proctora — aparat średniowymiarowy, 5 — metoda wibracyjna

Otrzymane wyniki, zamieszczone na rysunku 3, wskazują, że zwiększanie wilgotności kruszywa w zakresie 2÷8% powodowało stopniowe, nieduże zmniejszenie (łącznie o ok. 4% względnych) gęstości objętościowej szkieletu. Dalsze zwiększanie wilgotności spowodowało zwiększenie gęstości objętościowej szkieletu, szczególnie wyraźne w wąskim przedziale wilgotności od 10,5 do 12,5%. Powyżej podanej wilgotności następowało wyraźne zmniejszenie wartości gęstości objętościowej szkieletu. Maksymalna wartość gęstości objętościowej szkieletu wystąpiła przy wilgotności 12,4%. Uzyskany charakter zależności pomiędzy gęstością objętościową szkieletu a wilgotnością był typowy dla gruntów badanych metodami wibracyjnymi [5, 14]:

- przy wilgotności mniejszej od 8% charakter zależności ρ_d od w był quasi-liniowy (krzywa wykresu „ ρ_d-w ” stopniowo obniżająca się),
- przy wilgotności od 8÷12,5% charakter zależności ρ_d od w był silnie nieliniowy (krzywa wykresu „ ρ_d-w ” ostro wznosząca się),

- przy wilgotności większej od 12,5% charakter zależności ρ_d od w był również silnie nieliniowy, przy czym następuje zmiana kierunku przebiegu krzywej wykresu „ $\rho_d - w$ ” (krzywa ostro obniżająca się).

4.3. Porównanie wyników zagęszczania kruszywa metodami ubijania i wibracji

Analizę porównawczą przeprowadzono dla kruszywa zagęszczanego metodą ubijania (kruszywo o wilgotności od około 7÷15% zagęszczane w aparacie standardowym i średniowymiarowym przy dwóch energiach zagęszczania) oraz metodą wibracyjną (kruszywo o wilgotności od 2,4÷14,4% zagęszczane w jednej warstwie przy obciążeniu 4,6 kPa). Wykresy zależności gęstości objętościowej szkieletu od wilgotności otrzymane z badań obiema metodami przedstawiono na rysunku 3. Przebieg wykresów wskazuje na podobny charakter zmian wartości ρ_d zachodzących w wyniku zwiększania wilgotności od około 7÷15%. Porównując parametry zagęszczalności otrzymane z obu metod można stwierdzić, że wartość maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu uzyskana metodą wibracji (ok. $2,12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) była większa od wartości tego parametru uzyskanych metodami ubijania przy energii $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ — o 11% względnych w przypadku aparatu standardowego i 8% względnych w przypadku aparatu średniowymiarowego. Była ona również większa (o ok. 3%) od odpowiedniej wartości uzyskanej metodą ubijania w aparacie standardowym przy energii $2,65 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$, natomiast nieznacznie mniejsza (o 1,1%) od odpowiedniej wartości uzyskanej w aparacie średniowymiarowym przy tej samej energii zagęszczania. Wartość wilgotności optymalnej otrzymana metodą wibracyjną była większa o 22% względnych od odpowiedniej wartości uzyskanej metodą ubijania w aparacie standardowym przy obu energiach zagęszczania. Była natomiast bardzo zbliżona do odpowiednich wartości uzyskanych w aparacie średniowymiarowym przy obu energiach zagęszczania. Najbardziej zbliżone do siebie były wartości wilgotności optymalnej otrzymane metodą wibracyjną oraz metodą ubijania w aparacie średniowymiarowym przy większej energii zagęszczania ($2,65 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Wybór odpowiedniej metody zagęszczania w warunkach terenowych dotyczy m.in. wymogu uzyskania jednorodnego zagęszczenia gruntu w danej warstwie. W tabeli 3 przedstawiono wyniki oznaczeń parametrów zagęszczalności w górnej, środkowej i dolnej części warstwy kruszywa ubijanego w średniowymiarowym aparacie Proctora przy energii standardowej oraz zagęszczanego metodą wibracyjną.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że bardziej równomierne zagęszczenie prób uzyskano przy stosowaniu metody ubijania niż metody wibracyjnej. Przy zagęszczaniu metodą ubijania uzyskano bardzo jednorodny rozkład wilgotności, a różnica wartości gęstości objętościowej szkieletu w najbardziej i najmniej zagęszczonej warstwie nie przekraczały 2% względnych. Podobne zależności podczas zagęszczania drobnoziarnistych spoiwych i niespoistych gruntów naturalnych przedstawiono w pracy Dziedzicka [2]. Z kolei w metodzie wibracyjnej wilgotność warstwy górnej była prawie 2-krotnie mniejsza niż warstwy dolnej, a różnica wartości gęstości objętościowej szkieletu wyniosła odpowiednio 8% względnych. Tak duża niejednorodność próbki kruszywa zagęszczanej metodą wibracyjną może wynikać m.in. z tego, że wibracja powoduje dużą segregację ziaren

kruszywa, co było również obserwowane podczas niektórych badań terenowych [1]. Na skutek wibracji frakcje drobne w trakcie zagęszczania ulegają przemieszczaniu w dolną warstwę próbki, powodując niedobór tych frakcji w górnej warstwie.

TABELA 3

Wartości wilgotności oraz gęstości objętościowej szkieletu próbek zagęszczanych metodą wibracyjną i ubijania

Położenie warstwy	Parametry zagęszczalności w metodzie:			
	wibracyjnej		ubijania	
	wilgotność, w [%]	gęstość objętościowa szkieletu, ρ_d [g · cm ⁻³]	wilgotność, w [%]	gęstość objętościowa szkieletu, ρ_d [g · cm ⁻³]
Górna	7,3	1,88	10,1	1,89
Środkowa	9,6	1,97	10,1	1,92
Dolna	14,0	2,04	10,2	1,93
Średnia dla całej próby	10,2	1,96	10,1	1,91

5. Wnioski

Na podstawie uzyskanych rezultatów badań oraz ich analizy można stwierdzić, że:

- 1) Wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu pozwalają scharakteryzować badane kruszywo z żużla wielkopieczowego jako materiał o korzystnych cechach uziarnienia zapewniających dobrą zagęszczalność.
- 2) Otrzymane z badań wartości parametrów zagęszczalności były zależne od zastosowanej metody oraz warunków badania.
- 3) W metodzie ubijania istotny wpływ na wartości parametrów zagęszczalności gruntu wywiera energia zagęszczania, tzn. zwiększenie energii zagęszczania powoduje wyraźne zwiększenie wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu oraz nieznaczne zmniejszenie wilgotności optymalnej.
- 4) W metodzie wibracyjnej duży wpływ na wartości parametrów zagęszczalności ma wilgotność kruszywa, czas wibracji, obciążenie oraz grubość zagęszczanych warstw. Dla badanego kruszywa największą wartość gęstości objętościowej szkieletu uzyskano przy zagęszczaniu go w jednej warstwie przez 4 minuty przy wilgotności 12% i obciążeniu 4,6 kPa.

- 5) Metoda wibracyjna pozwala uzyskać wyraźnie większe wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu w stosunku do metody ubijania przy energii standardowej. Wartości parametrów zagęszczalności uzyskanych metodą wibracyjną są bardzo zbliżone do odpowiednich parametrów uzyskanych metodą ubijania w średniowymiarowym aparacie Proctora przy energii zmodyfikowanej. Świadczy to o dużej efektywności zagęszczania gruntów gruboziarnistych, w tym odpadów przemysłowych, metodą wibracyjną. Metoda ta powinna być szeroko stosowana zarówno w badaniach laboratoryjnych dla określania optymalnych wartości parametrów zagęszczalności, jak i przy kontroli jakości zagęszczenia nasypów konstrukcyjnych wznoszonych z tego typu materiałów.

LITERATURA

- [1] Douwes Dekker D.M., Davis P.G.J.: Large-scale compaction tests for the foundation of a storm surge barrier in the Oosterschelde estuary. Colloque international sur le compactage. Anciens Eleves de l'ENPC, 1980, 319–324
- [2] *Dziedziak R.*: Analiza dokładności przebiegu krzywej uzyskanej z badań w aparacie Proctora dla różnych gruntów. Praca magisterska, Akademia Rolnicza, Kraków, 1983 (maszynopis)
- [3] *Glinicka M.J.*: Czynniki wpływające na zagęszczenie gruntów drobnoziarnistych metodą pulsacyjną. IV Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce, 1998, 29–37
- [4] *Lubking P., Janse E., Jonker J.F., de Jager W.F.J.*: Investigations of the variation of density, rigidity and bearing capacity measuring results on behalf of the acceptance control of sand subbases. Colloque international sur le compactage. Anciens Eleves de l'ENPC, 1980, 515–521
- [5] *Pisarczyk S.*: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2004
- [6] PN-86/B-02480: Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa
- [7] PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badania próbek gruntu. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa
- [8] *Skarżyńska K.M.*: Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Kraków, Wyd. AR 1997
- [9] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. Warszawa, Wyd. Komunikacji i Łączności 2003
- [10] *Zawisza E., Biernat M.*: Wytrzymałość na ścinanie kruszywa z żużla wielkopiecowego. Drogownictwo, 2, 2007, 48–51
- [11] *Zawisza E., Kawala J.*: Wpływ dodatku popiołu lotnego na zagęszczalność i wytrzymałość na ścinanie żużla wielkopiecowego. Akademia Rolnicza, Zakład Mechaniki Gruntów i Budownictwo Ziarnego, 2007 (maszynopis)
- [12] *Zawisza E., Starowicz G.*: Wytrzymałość na ścinanie odpadów pohnicznych w świetle badań w aparatach bezpośredniego ścinania. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo, 111, 2007, 435–447
- [13] *Zawisza E., Suknarowski M.*: Badania wpływu zagęszczenia i nawodnienia na ścisłość kruszywa z żużla wielkopiecowego. Przegląd Górniczy, 7–8, 2006, 82–86
- [14] *Zydroń T., Zawisza E.*: Badania wpływu metody zagęszczania na maksymalną gęstość objętościową szkieletu i wilgotność optymalną odpadów poenergetycznych. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, 420, 26, 2005, 425–433