

WŁAŚCIWOŚCI GEOLOGICZNO-INŻYNIERSKIE I MIKROSTRUKTURALNE GLIN LODOWCOWYCH ZANIECZYSZCZONYCH SUBSTANCJAMI ROPOPOCHODNYMI

ENGINEERING-GEOLOGICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF GLACIAL TILLS POLLUTED WITH PETROLEUM SUBSTANCES

DOROTA IZDEBSKA-MUCHA¹, CECYLIA SZYSZKO¹, JERZY TRZCIŃSKI¹

Abstrakt. Badania przeprowadzono na terenie bazy paliwowej położonej w północno-wschodniej Polsce, gdzie poziomy gliny lodowcowej zostały zanieczyszczone olejem napędowym w obrębie pola podziemnych zbiorników. W artykule przedstawiono charakterystykę mikrostruktury gruntu niezanieczyszczonego (NS) oraz gruntu zanieczyszczonego (SR) *in situ* olejem napędowym (ON). Dokonano również analizy zmian parametrów geologiczno-inżynierskich: uziarnienia, gęstości właściwej szkieletu gruntowego, granic konsystencji oraz wskaźnika plastyczności w zależności od stopnia zanieczyszczenia ON past gruntowych sporządzonych z gruntu NS. Badania mikrostrukturalne przeprowadzono na próbkach NNS, natomiast do badań parametrów geologiczno-inżynierskich przygotowano serię past zawierających 0, 2, 4, 8, 12, 16% wag. ON w stosunku do suchej masy gruntu. Pomiary uziarnienia przeprowadzone metodą pipetową i mikroagregatową wykazały, że wraz ze wzrostem zanieczyszczenia zwiększa się zawartość frakcji piaskowej, a spada zawartość frakcji pyłowej i ilowej. Większy zakres zmian uziarnienia uzyskano z badań metodą mikroagregatową. Wartości granicy skurezalności, plastyczności i płynności oraz wskaźnika plastyczności wzrosły, a gęstości właściwej szkieletu gruntowego zmalały wraz ze wzrostem zawartości ON. Spadek wartości gęstości właściwej szkieletu gruntowego jest związany z adsorpcją węglowodorów na ziarnach i cząstkach mineralnych. Badania mikrostrukturalne wykonane z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz programu komputerowego STIMAN wykazały zwiększenie porowatości, liczby mezoporów, średnich i maksymalnych wartości obwodu, powierzchni i średnicy porów w gruncie SR. Mikrostruktura gruntu SR stała się bardziej izotropowa, na co wskazują spadek wartości wskaźnika anizotropii mikrostruktury i liczby porów szczelinowatych oraz wzrost średniej wartości współczynnika formy porów.

Słowa kluczowe: mikrostruktura, glina lodowcowa, zanieczyszczenia ropopochodne, uziarnienie, granice konsystencji.

Abstract. In this paper the microstructural characteristic of glacial till polluted *in situ* with diesel oil (ON) is presented as well as the analysis of: particle size distribution, Atterberg limits, plasticity index and particle density in relation to the degree of the soil pollution. The microstructural study was conducted on undisturbed soil samples, while the engineering-geological parameters were tested on soil pastes containing 0, 2, 4, 8, 12, 16% of ON. The obtained results showed that as the pollution degree increases the content of silt and clay decreases and the content of sand increases. It was observed in polluted samples that the values of Atterberg limits and plasticity index increased, while the particle density values decreased due to adsorption of hydrocarbons on soil particles. Microstructural analysis was conducted using Scanning Electron Microscope (SEM) and STIMAN software. The analysis revealed an increase of values in such morphological parameters as: total porosity, number of mesopores, pore diameter, pore area and pore perimeter. The microstructure converted to more isotropic, which was supported by decrease in coefficient of anisotropy and number of fissure pores.

Key words: microstructure, glacial till, petroleum pollution, particle size distribution, Atterberg limits.

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; dim@uw.edu.pl; jerzy.trzcinski@uw.edu.pl

WSTĘP

Substancje ropopochodne stanowią jedno z głównych źródeł zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego. Rosnąca świadomość potrzeby ochrony środowiska zaowocowała zaostrzonymi regulacjami prawnymi w zakresie zapobiegania i naprawy szkód wyrządzonych środowisku naturalnemu. Podstawę dla ochrony powierzchni Ziemi stanowią akty prawne rangi ustaw i rozporządzeń, a także regulacje zawarte w prawie Unii Europejskiej (np. ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska – Dz.U. z 2008 r. Nr 25, poz. 150, z późn. zm.; ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 r. o ochronie przyrody – Dz.U. z 2009 r. Nr 151, poz. 1220, z późn. zm.; ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych – Dz.U. z 2004 r. Nr 121, poz. 1266, z późn. zm.; ustawa z dnia 30 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie – Dz.U. Nr 75, poz. 493, z późn. zm.; ustawa z dnia 4 lutego 1994 r. – Prawo geologiczne i górnicze – Dz.U. z 2005 r. Nr 228, poz. 1947, z późn. zm.; rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi – Dz.U. 2002 r. Nr 165, poz. 1359).

W latach 70. rozpoczęto w Polsce prace nad rozpoznaniem i likwidacją zanieczyszczeń ropopochodnych w podłożu wodno-gruntowym (Kościelniak i in., 2000), jednakże rosnące wydobywanie, transport, przeróbka i użytkowanie produktów naftowych stwarzają potencjalne zagrożenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Zarówno w zakresie planowania robót remediacyjnych, jak i oceny wpływu zanieczyszczenia na istniejące lub planowane konstrukcje budow-

lane niezbędna jest znajomość wpływu tych zanieczyszczeń na właściwości geologiczno-inżynierskie gruntów.

Obecny stan wiedzy wskazuje jednoznacznie, że substancje ropopochodne powodują niekorzystne zmiany w: mikrostrukturze (np. Caravaca, Roldan, 2003; Izdebska-Mucha, Trzeciński, 2007, 2008; Izdebska-Mucha i in., 2011), przepuszczalności (np. Fernandez, Quigley, 1985; Bowders, Daniel, 1987; Uppot, Stephenson, 1989; Herzig, Szczepańska, 1999), parametrach fizyczno-chemicznych (np. Kaya, Fang, 2000; Herzig, 2001; Korzeniowska-Rejmer, Izdebska-Mucha, 2006; Moavenian, Yasrobi, 2008; Izdebska-Mucha, Korzeniowska-Rejmer, 2009; Singh i in., 2009) oraz parametrach mechanicznych gruntu (np. Barański, 2000; Korzeniowska-Rejmer, 2001; Khamehchiyan i in., 2007). Znajomość tych zagadnień w zakresie mechanizmu zmian, oceny ilościowej w zależności od jakości i zawartości zanieczyszczeń czy rodzaju gruntu nie jest jednak wystarczająca, aby móc kompleksowo ocenić stopień zagrożenia i zakres przekształceń w podłożu gruntowym w przypadku jego zanieczyszczenia związkami ropopochodnymi.

W artykule przedstawiono charakterystykę mikrostruktury gliny lodowcowej zanieczyszczonej *in situ* olejem napędowym oraz analizę zmian jej wybranych właściwości, m.in. uziarnienia, gęstości właściwej szkieletu gruntowego i parametrów konsystencji w zależności od stopnia zanieczyszczenia. Są to podstawowe właściwości gruntu, mające kluczowe znaczenie przy jego ocenie jako podłoża budowlanego lub materiału do budowy barier izolacyjnych.

METODYKA BADAŃ

Próbki gruntu zostały pobrane na terenie bazy paliwowej położonej w północno-wschodniej Polsce. Zanieczyszczenie olejem napędowym nastąpiło w obrębie pola podziemnych zbiorników z paliwem, gdzie w wyniku awarii doszło do przepełnienia jednego z nich i powierzchniowego rozlania oleju napędowego (fig. 1, 2). Na obszarze, gdzie miały miejsce spływ i stagnacja oleju, nastąpiła pionowa migracja substancji ropopochodnych w podłożu gruntowym. Próbki gruntu do badań laboratoryjnych zostały pobrane na terenie nie objętym skażeniem (grunt niezanieczyszczony – NS) oraz na obszarze zanieczyszczonym (grunt zanieczyszczony – SR). W profilu pionowym 2-metrowych szurfów stwierdzono występowanie dwóch poziomów gliny lodowcowej (Izdebska-Mucha, Trzeciński, 2007, 2008). Próbki gruntu pobrano z głębokości 1,5–1,7 m.

Badania mikrostrukturalne wykonano na próbkach o nieznaczącej strukturze (NNS), natomiast badania uziarnienia, parametrów konsystencji oraz gęstości właściwej przeprowadzono na pastach gruntu zanieczyszczonego w warunkach laboratoryjnych. Przygotowanie past gruntowych polegało na

usunięciu gładzików, wstępnym rozdrobieniu oraz wysuszeniu gruntu w temperaturze 105–110°C. Następnym etapem było roztarcie i przesianie gruntu przez sito o wymiarze oczek 2 mm. Tak przygotowany grunt został podzielony na 6 części, z których każda została zanieczyszczona olejem napędowym (ON) w taki sposób, aby zawartość oleju wynosiła 0, 2, 4, 8, 12, 16% wag. w stosunku do suchej masy gruntu.

Badania składu granulometrycznego przeprowadzono metodą pipetową wg PN-88/B-04481 oraz metodą mikroagregatową wg Myślińskiej (2010). Analizy sedymentacyjne uzupełniono analizą sitową. Oznaczenie granicy plastyczności (w_p) wykonano metodą wałeczowania wg PN-88/B-04481, a granicy płynności (w_L) metodą penetrometru stożkowego firmy Ele (UK) wg BS1377: Part 2: 1990: 4.3. Granicę skurczalności (w_s) obliczono wg wzoru Krabbego z 1958 r. (za Schultze, Muhs, 1967): $w_s = w_L - 1,25 I_p$, gdzie: w_s – wilgotność granicy skurczalności [%], w_L – wilgotność granicy płynności [%], I_p – wskaźnik plastyczności [%]. Badania gęstości właściwej szkieletu gruntowego (ρ_s) wykonano przy użyciu piknometru helowego firmy Micromeritics (USA).



Fig. 1. Fragment pola podziemnych zbiorników z paliwem. Ścieżka przepływu oleju napędowego zaznacza się brakiem roślinności

Underground fuel tank field. The damage of grass shows the diesel oil flowing path

Do badań mikrostrukturalnych wykorzystano metodykę analizy mikrostrukturalnej z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (Trzeciński, 1998, 2003, 2004; Izdebska-Mucha, Trzeciński, 2007, 2008). Przeprowadzono analizę jakościową szkieletu i przestrzeni porowej oraz analizę ilościową parametrów morfometrycznych i geometrycznych przestrzeni porowej. Charakterystykę jakościową wykonano na podstawie dokumentacji fotograficznej, a pro-



Fig. 2. Miejsce stagnacji oleju napędowego

The site of diesel oil stagnation

cedurę ilościową przeprowadzono z pomocą oprogramowania STIMAN (Sokolov i in., 2002). Zastosowano klasyfikację mikrostruktur i przestrzeni porowej wg Grabowskiej-Olszewskiej i in. (1984). Badania wykonano z zastosowaniem mikroskopu firmy Jeol, model JSM 6380LA w Laboratorium Skaningowej Mikroskopii Elektronowej i Mikroanalizy Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

WYNIKI BADAŃ

Badany grunt to glina górnego stadiała zlodowacenia wisły (Rabek, Świerszcz, 2003). Zawartość węglowodorów w glinie z terenu skażonego wynosiła 5394,8 mg/kg s.m., w tym 1456,6 mg/kg s.m. stanowiły benzyny, a 3938,2 mg/kg s.m. oleje. Analiza rentgenostrukturalna wykazała, że glina składa się z illitu, kaolinitu, smektytu i kwarcu. Na podstawie badań właściwości sorpcyjnych metodą błękitu metyle-

nowego (PN-88/B-04481, Piaskowski, 1984) określono wartości powierzchni właściwej – 24 m²/g oraz pojemności wymiany kationowej CEC – 3,09 meq/100 g.

Skład granulometryczny. Rezultaty badań składu granulometrycznego past gruntowych przedstawiono w tabeli 1 i na figurze 3. Analiza porównawcza otrzymanych wyników wykazała znaczne różnice w zawartości poszczególnych frak-

Tabela 1

Wyniki badań składu granulometrycznego metodą analizy pipetowej i mikroagregatowej

Particle size distribution results from pipette method and microaggregate analysis

Zawartość oleju napędowego ON [%]	Analiza pipetowa				Analiza mikroagregatowa			
	frakcja piaskowa f_p [%]	frakcja pyłowa f_π [%]	frakcja iłowa f_i [%]	nazwa i symbol gruntu	frakcja piaskowa f_p [%]	frakcja pyłowa f_π [%]	frakcja iłowa f_i [%]	nazwa i symbol gruntu
0	51	30	19	Glina piaszczysta G_p	16	80	4	Pył π
2	52,5	30	17,5		15	81,5	3,5	
4	54,5	28	17,5		15	83	2	
8	55,5	27	17,5		22,5	75	2,5	
12	56,5	26	17,5		21	75	4	
16	58,5	26	15,5		27	70	3	

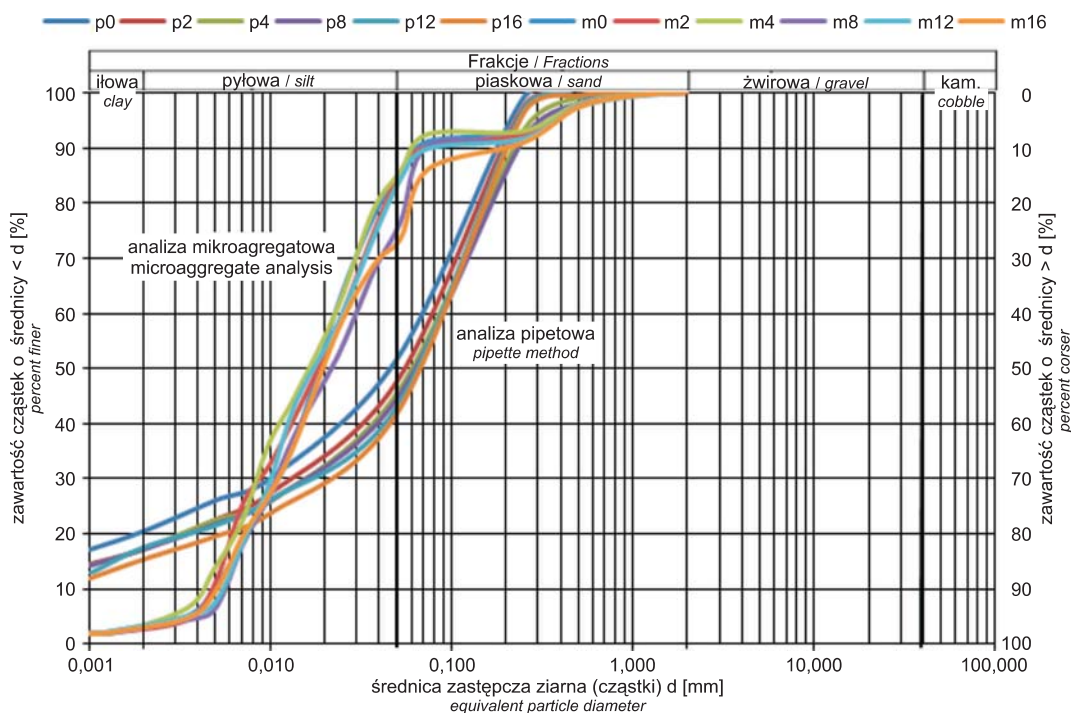


Fig. 3. Krzywe uziarnienia past gliny lodowcowej zanieczyszczonej olejem napędowym

p0 do p16 – wyniki badań metodą pipetową dla past zawierających od 0 do 16% ON; m0 do m16 – wyniki badań metodą mikroagregatową dla past zawierających od 0 do 16% ON

Grain size distribution of glacial till polluted with diesel oil

p0 to p16 – results from pipette method for samples containing from 0 to 16% of ON; m0 to m16 – results from microaggreagate analysis for samples containing from 0 to 16% of ON

cji uziarnienia. Według metody pipetowej wszystkie próbki określone zostały jako glina piaszczysta (Gp), natomiast według metody mikroagregatowej jako pył (π). Otrzymane wyniki pozwalają również zaobserwować wpływ zanieczyszczenia olejem napędowym na skład granulometryczny gruntu. Zarówno w analizie pipetowej, jak i mikroagregatowej stwierdzono wzrost zawartość frakcji piaskowej, a spadek zawartości frakcji pyłowej wraz ze wzrostem zanieczyszczenia gruntu. Zawartość frakcji łąowej wg metody

mikroagregatowej jest bardzo niska i nie różni się istotnie dla poszczególnych próbek (od 2 do 4%), natomiast wg analizy pipetowej maleje z 19 do 15,5%. Obserwuje się, że w analizie mikroagregatowej zmiany zawartości frakcji piaskowej i pyłowej są znacznie większe niż w analizie pipetowej.

Granice konsystencji i wskaźnik plastyczności. Rezultaty badań granicy skurczalności (w_s), granicy plastyczności (w_p) i granicy płynności (w_L) oraz wskaźnika plastyczności

Tabela 2

Wyniki badań gęstości właściwej szkieletu gruntowego, granic konsystencji i wskaźnika plastyczności

Particle density, Atterberg limits and plasticity index results

Zanieczyszczenie olejem napędowym [%]	Gęstość właściwa ρ_s [Mg/m ³]	Granica skurczalności w_s [%]	Granica plastyczności w_p [%]	Granica płynności w_L [%]	Wskaźnik plastyczności I_p [%]
0	2,68	8,69	12,35	27,0	14,65
2	2,67	10,46	13,97	28,0	14,03
4	2,65	11,19	14,85	29,5	14,65
8	2,64	11,76	15,71	31,5	15,79
12	2,59	11,96	15,97	32,0	16,03
16	2,51	13,33	17,36	33,5	16,14

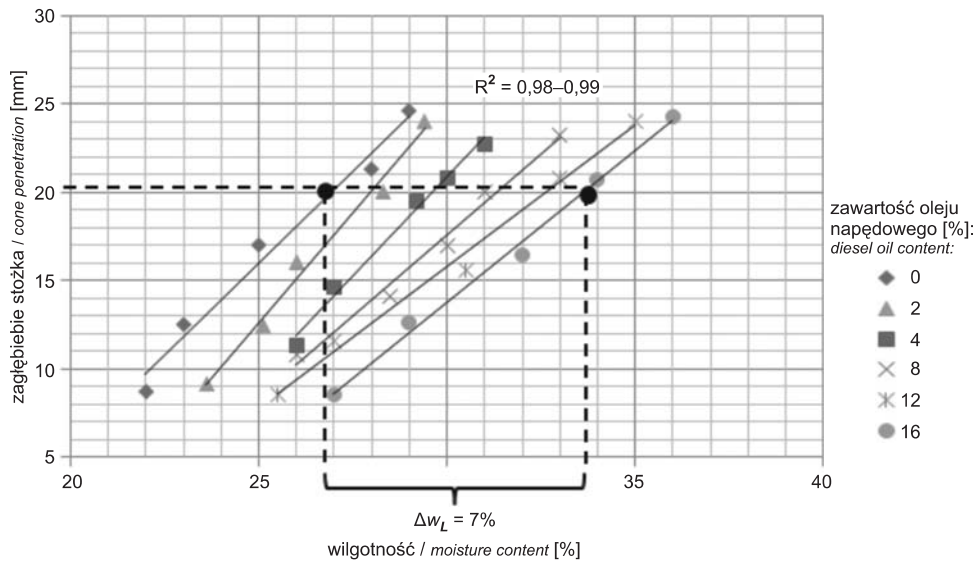


Fig. 4. Wyniki badań granicy płynności w_L metodą penetrometru stożkowego (wg BS1377: Part 2:1990:4.3)

Liquid limit results w_L from cone penetrometer test (BS1377: Part 2:1990:4.3)

(I_p) przedstawiono w tabeli 2 oraz na figurach 4 i 5. Wartości wszystkich granic konsystencji zwiększają się wraz ze wzrostem zawartości oleju napędowego ON zanieczyszczającego grunt. Wzrost ten jest prawie stały i wynosi około 5,0–6,5%

dla każdej z granic (największy dla granicy płynności). Również zanotowano wzrost wskaźnika plastyczności, ale już nie tak znaczny, niespełna dwuprocentowy. Wykresy zależności granic konsystencji od zawartości oleju napędowego wykazują wysoki wskaźnik dopasowania, R^2 wynosi od 0,81 do 0,96.

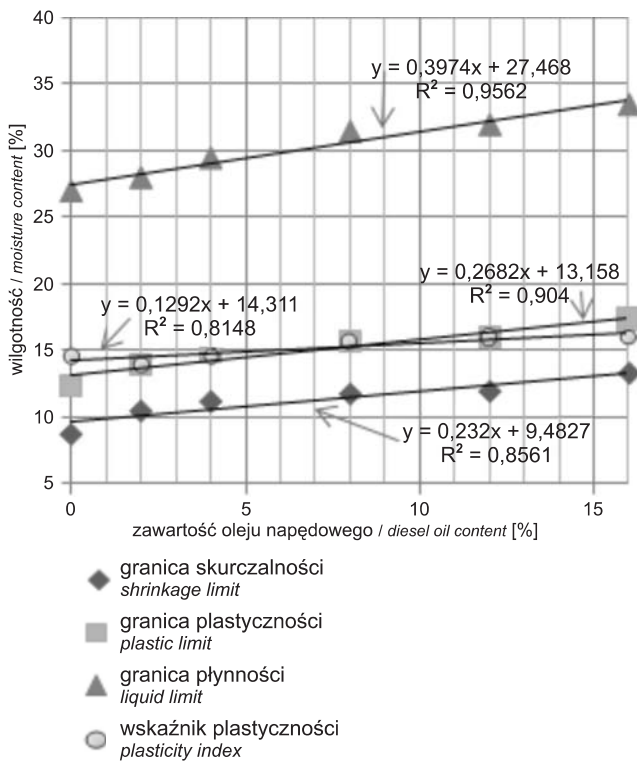


Fig. 5. Zależność granic konsystencji od zawartości oleju napędowego

Relationship between Atterberg limits and diesel oil content

Pomiary gęstości właściwej szkieletu gruntowego (ρ_s) wykazały, że wraz ze wzrostem zanieczyszczenia olejem napędowym wartości tego parametru maleją (fig. 6, tab. 2). Stwierdzono spadek wartości z 2,68 Mg/m^3 dla gliny NS (0% ON) do 2,51, Mg/m^3 dla gliny SR zawierającej 16% ON. Zmiana ta wynika prawdopodobnie z obecności węglowodorów frakcji olejowych ($>C_{12}$) zaadsorbowanych na szkielecie mineralnym gruntu. Związki te mają mniejszą gęstość aniżeli minerały budujące szkielet oraz nie ulegają całkowitemu odparowaniu podczas suszenia w temperaturze 105°C.

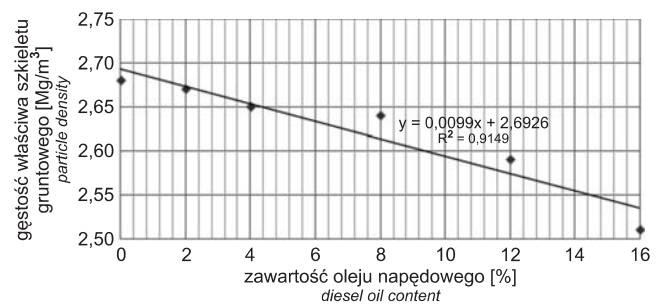


Fig. 6. Zależność gęstości właściwej od zawartości oleju napędowego

Relationship between particle density and diesel oil content

Tabela 3

Ilościowe parametry mikrostruktury gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego (SR) olejem napędowym

Quantitative parameters of the microstructure of unpolluted soil (NS) and soil polluted with diesel oil (SR)

Parametry mikrostrukturalne	Głina niezanieczyszczona NS ¹						Głina zanieczyszczona SR ²					
	min	max	średnia	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności [%]		min	max	średnia	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności [%]	
Porowatość n [%]	19,2	30,8	24,9	4,64	19		21,5	26,8	24,4	2,12	9	
Liczba porów $N \times 10^3$	178	1503	730	456	62		265	752	420	195	46	
Całkowita powierzchnia porów $S_f \times 10^3$ [μm^2]	446	2866	2102	882	42		1979	2530	2276	210	9	
Maksymalna powierzchnia porów S_{max} [μm^2]	9356	130565	92301	48697	53		43782	375622	140862	135013	96	
Minimalna powierzchnia porów S_{min} [μm^2]	0,07	0,07	0,07	0,00	0		0,07	0,07	0,07	0	0	
Średnia powierzchnia porów S_{av} [μm^2]	1,91	4,65	3,15	0,96	30		3,36	8,99	6,09	2,04	34	
Całkowity obwód porów $P_f \times 10^3$ [μm]	1105	7932	4027	2298	57		2240	4267	2689	884	33	
Maksymalny obwód porów P_{max} [μm]	2320	15131	9900	4554	46		8089	27827	15032	7920	53	
Minimalny obwód porów P_{min} [μm]	1,23	1,41	1,37	0,08	5,52		1,32	1,58	1,41	0,12	8,68	
Średni obwód porów P_{av} [μm]	5,28	6,53	5,73	0,53	9		5,68	8,52	6,74	1,28	19	
Maksymalna średnica porów D_{max} [μm]	109	408	326	118	36		236	692	392	179	46	
Minimalna średnica porów D_{min} [μm]	0,30	0,30	0,30	0,0	0		0,30	0,30	0,30	0,00	0	
Średnia średnica porów D_{av} [μm]	0,70	0,92	0,80	0,08	10		0,8	1,13	0,93	0,15	15,7	
Mikropory $0,1 < \varnothing < 10 \mu\text{m}$ [%]	24,6	46,9	31,6	9,2	29		17,3	30,8	21,4	5,5	26	
Mezopory $10 < \varnothing < 1000 \mu\text{m}$ [%]	53,1	75,4	68,5	9,2	13		69,2	82,7	78,6	5,5	7,04	
Maksymalny współczynnik formy porów K_{fmax} [-]	0,922	0,981	0,950	0,022	2,36		0,908	0,982	0,948	0,032	3,39	
Minimalny współczynnik formy porów K_{fmin} [-]	0	0,046	0,008	0,019	245		0	0,023	0,005	0,010	224	
Średni współczynnik formy porów K_{fav} [-]	0,34	0,429	0,398	0,032	8,12		0,399	0,458	0,421	0,028	6,53	
Pory izometryczne $a/b < 1,5$ [%]	10,8	13,2	12,2	1,0	8,4		9,5	17,4	12,4	3,1	25	
Pory anizometryczne $1,5 < a/b < 10$ [%]	84,8	88,3	85,9	1,3	1,48		80,8	88,9	86,4	3,2	3,73	
Pory szczelinowate $a/b > 10$ [%]	0,6	3,0	2,0	1,0	51		0,2	2,7	1,3	1,0	77	
Wskaźnik anizotropii mikrostruktury K_a [%]	0,78	20,8	11,2	7,6	68		2,2	11,7	6,0	3,7	63	

¹ liczba analiz 6 / number of analysis

² liczba analiz 5 / number of analysis

\varnothing średnica zastępcza porów / equivalent pore diameter

a/b stosunek największego do najmniejszego wymiaru poru / the ratio of the largest to the smallest pore dimension

Mikrostruktura gruntu

Charakterystyka jakościowa. Glinę lodowcową cechuje mikrostruktura matrycowa (wg klasyfikacji Grabowskiej-Olszewskiej i in., 1984), która zbudowana jest z matrycy ilastej i tkwiących w niej ziaren piaszczystych i pylastych (fig. 7, A1, A2 – cienkie, długie strzałki). Powierzchnia ziaren często pokryta jest otoczkami ilastymi (A1 – cienka, lewa długa strzałka, A2 – cienka, długa dolna strzałka).

Gлина niezanieczyszczona (NS). Matryca jest silnie zagregowana. Ilaste elementy strukturalne są ściśle upakowane oraz ciasno i równolegle przylegają do siebie. Otoczki ilaste ściśle związane są z powierzchnią ziaren. Pomiędzy mikroagregatami ilastymi przeważają kontakty typu płaszczyzna-płaszczyzna (F-F) i krawędź-krawędź (E-E) – B1 cienkie, długie strzałki. Przestrzeń porowa składa się z dużych porów międzyagregatowych (A1 – grube strzałki) i międzymikroagregatowych (B1 – grube strzałki).

Gлина zanieczyszczona (SR). Matryca ilasta zagregowana jest znacznie słabiej. Cząstki ilaste budujące agregaty i mikroagregaty upakowane są luźniej, a niektóre mikroagregaty rozpadły się. Otoczki ilaste są luźno związane z powierzchnią ziaren. Pomiędzy mikroagregatami ilastymi przeważają kontakty typu płaszczyzna-krawędź (F-E) – B2 cienkie, długie strzałki. Przestrzeń porową budują głównie pory międzymikroagregatowe (A2 – cienkie, krótkie strzałki, B2 – grube strzałki) oraz wewnątrzmikroagregatowe (B2 – cienkie, krótkie strzałki).

Charakterystyka parametrów ilościowych. Stwierdzono wyraźne różnice w wartości parametrów morfometrycznych i geometrycznych przestrzeni porowej pomiędzy gliną NS i SR (tab. 3). Średnia wartość porowatości nie uległa zmianie, ale współczynnik zmienności jest większy dla gliny NS, a wartość minimalna wyższa dla gliny SR. Liczba porów zmniejszyła się w glinie SR, a wartość maksymalna jest dużo wyższa w glinie NS. Analiza parametrów morfometrycznych wykazała, że całkowita powierzchnia porów w glinie SR nie zmieniła się znacząco, natomiast wyraźne przesunięcie w kierunku wyższych wartości wykazały parametry maksymalnej i średniej powierzchni porów. Wartość minimalnej powierzchni nie uległa zmianie. Całkowity obwód porów jest mniejszy, natomiast maksymalna, minimalna i średnia wartość tego parametru są większe w glinie SR. Parametry maksymalnej i średniej średnicy porów wzrosły w glinie SR, a wartość minimalnej średnicy porów pozostała bez zmian. Istotne zmiany zaszły w rozkładzie wielkości porów. W glinie SR znacznie zmniejszyła się liczba mikroporów, a wzrosła mezoporów. Ponadto nastąpiły zmiany parametrów geometrycznych. W glinie SR wzrosła średnia wartość współczynnika formy porów. Analiza kształtu porów wykazała, że w glinie SR nastąpił spadek zawartości porów szczelinowatych, a wzrósł udział porów anizometrycznych i izometrycznych. Istotnie zmniejszyła się także wartość wskaźnika anizotropii mikrostruktury.

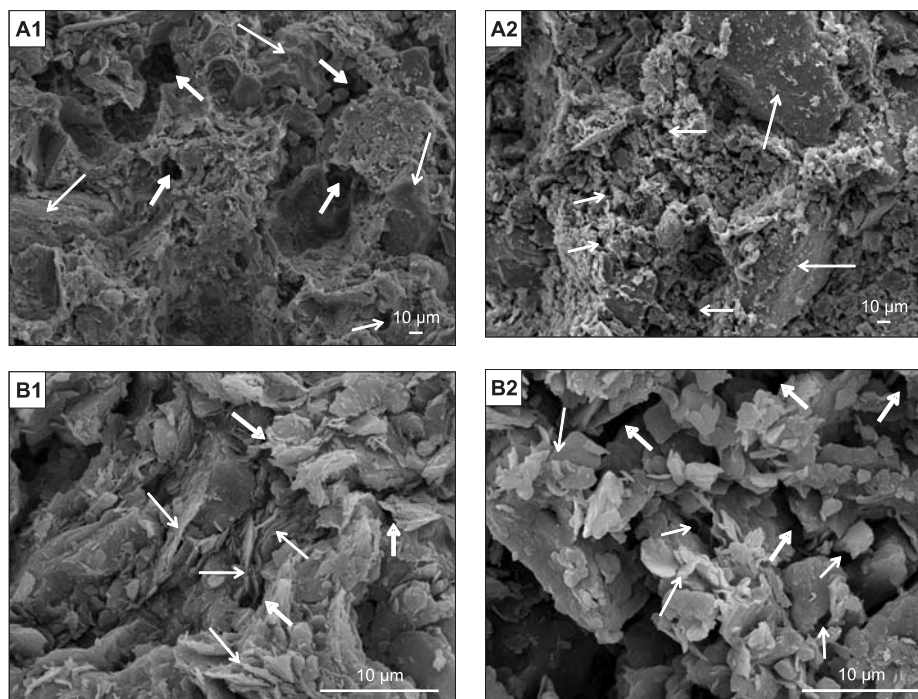


Fig. 7. Mikrostruktura gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego (SR) olejem napędowym

A1, B1 – grunt niezanieczyszczony, A2, B2 – grunt zanieczyszczony. Powiększenie: A1, A2 – 400x, B1, B2 – 3300x. Szczegółowy opis mikrostruktur w tekście

Microstructure of unpolluted (NS) and soil polluted with diesel oil (SR)

A1 and B1 – unpolluted soil, A2 and B2 – polluted soil. Magnification: A1, A2 – 400x, B1, B2 – 3300x. Detailed description of the microstructures in the text

WNIOSKI

1. Badaniom poddano gliny lodowcowe górnego stadia zlodowacenia wisły z terenu bazy paliwowej położonej w północno-wschodniej Polsce. W wyniku awarii doszło do przepełnienia zbiornika z paliwem i powierzchniowego rozlania oleju napędowego.

2. Badania składu granulometrycznego próbek glin przeprowadzone metodą pipetową i mikroagregatową wykazały wzrost zawartości frakcji piaskowej, a spadek zawartości frakcji pyłowej i ilowej wraz ze wzrostem zanieczyszczenia gruntu.

3. Wartości wszystkich granic konsystencji oraz wskaźnika plastyczności zwiększyły się wraz ze wzrostem zawartości oleju napędowego, natomiast wartości gęstości właściwej szkieletu gruntowego zmalały z 2,68 Mg/m³ (0% ON) do 2,51, Mg/m³ (16% ON).

4. Głina lodowcowa charakteryzuje się mikrostrukturą matrycową. W glinie niezanieczyszczonej (NS) matryca ilasta jest silnie zagregowana, pomiędzy mikroagregatami ilastymi prze-ważają kontakty typu płaszczyna-płaszczyna (F-F) i kra-

wędź-krawędź (E-E), a przestrzeń porowa składa się z dużych porów międzyagregatowych i międzymikroagregatowych.

5. W glinie zanieczyszczonej (SR) matryca ilasta zagregowana jest znacznie słabiej, pomiędzy mikroagregatami ilastymi przeważają kontakty typu płaszczyna-krawędź (F-E), a przestrzeń porową budują głównie pory międzymikroagregatowe oraz wewnątrzmikroagregatowe.

6. Analiza parametrów ilościowych wykazała wzrost porowatości, liczby mezoporów, średnich i maksymalnych wartości obwodu, powierzchni i średnicy porów w glinie SR. Nastąpił również spadek wartości wskaźnika anizotropii mikrostruktury i liczby porów szczelinowatych oraz wzrost średniej wartości współczynnika formy porów. Mikrostruktura gliny SR stała się bardziej izotropowa.

7. Zmiany właściwości geologiczno-inżynierskich gruntu wynikają głównie z przebudowy jakościowej jego mikrostruktury oraz ilościowych zmian parametrów szkieletu gruntu i przestrzeni porowej.

LITERATURA

- BARAŃSKI M., 2000 — Wytrzymałość i odkształcalność glin lodowcowych zanieczyszczonych ropopochodnym benzenem na terenie Petrochemii Płock S.A. Rozprawa doktorska. Arch. Wydziału Geologii UW, Warszawa.
- BOWDERS J.J., DANIEL D.E., 1987 — Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *J. Geotechn. Engineer., ASCE*, **113**: 1432–1448.
- BS1377: Part 2: 1990: 4.3. Methods of testing soils for civil engineering purposes. British Standards Institution, London.
- CARAVACA F., ROLDAN A., 2003 — Assessing changes in physical and biological properties in a soil contaminated by oil sludges under semiarid Mediterranean conditions. *Geoderma*, **117**: 53–61.
- FERNANDEZ F., QUIGLEY R.M., 1985 — Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. *Canad. Geotech. J.*, **22**: 205–214.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N., 1984 — Atlas of the microstructure of clay soils. Państw. Wyd. Nauk., Warszawa.
- HERZIG J., 2001 — Wpływ zanieczyszczeń organicznych na wybrane parametry fizyczne gruntów spoistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, **3**: 141–143.
- HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J., 1999 — Wpływ zanieczyszczeń organicznych na przepuszczalność gruntów spoistych. Mat. Symp. Współczesne problemy hydrogeologii, t. 9: 113–117. Kielce.
- IZDEBSKA-MUCHA D., KORZENIOWSKA-REJMER E., 2009 — Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na właściwości fizyczne gruntów stosowanych do budowy mineralnych barier uszczelniających składowiska odpadów. *Czasopismo Techniczne*, **3**: 39–54.
- IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J., 2007 — Zmiany mikrostrukturalne gliny lodowcowej spowodowane zanieczyszczeniem olejem napędowym. *Geologos*, **11**: 463–471.
- IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J., 2008 — Effects of petroleum pollution on clay soil microstructure. *Geologija*, **50**: 68–74.
- IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J., ZBIK M.S., FROST R.L., 2011 — Influence of hydrocarbon contamination on clay soil microstructure. *Clay Minerals*, **46**, 1: 47–58.
- KAYA A., FANG H.Y., 2000 — The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Canad. Geotech. J.*, **37**: 943–950.
- KHAMEHCHIYAN M., CHARKHABI A.H., TAJIK M., 2007 — Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, **89**: 220–229.
- KORZENIOWSKA-REJMER E., 2001 — Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na charakterystykę geotechniczną gruntów, stanowiących podłoże budowlane. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, **2**: 83–87.
- KORZENIOWSKA-REJMER E., IZDEBSKA-MUCHA D., 2006 — Ocena wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na uziarnienie i plastyczność gruntów spoistych. *Inż. Ochr. Środ.*, **9**, 1: 89–103.
- KOŚCIELNIAK S., LEMAŃSKI J.F., ZABAWA S., 2000 — Wpływ zanieczyszczeń naftowych i chemicznych na środowisko przyrodnicze. Efekty likwidacji skażeń z wód i gruntów. VII Międzynarodowe Sympozjum Szkoleniowe, Piła.

- MOAVENIAN M.H., YASROBI S.S., 2008 — Volume change behavior of compacted clay due to organic liquids as permeant. *Appl. Clay Sci.*, **39**: 60–71.
- MYŚLIŃSKA E., 2010 — Laboratoryjne badania gruntów i gleb. Wyd. UW, Warszawa.
- PIASKOWSKI A. M. 1984 — Właściwości sorpcyjne i powierzchnia właściwa polskich gruntów. Badania nad sorpcją błękitu metylenowego. *Arch. Hydrotech.*, **31**, 3: 297–314.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- RABEK W., ŚWIERSZCZ B., 2003 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Chruściel. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- SCHULTZE E., MUHS H., 1967 — Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- SINGH S.K., SRIVASTAVA R.K., JOHN S., 2009 — Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation. *Canad. Geotech. J.*, **46**: 1077–1083.
- SOKOLOV V.N., YURKOVETS D. I., RAZGULINA O.V., 2002 — Stiman (Structural Image Analysis): a software for quantitative morphological analysis of structures by their images (User's manual. Version 2.0). Laboratory of Electron Microscopy, Moscow State University, Moscow.
- TRZCIŃSKI J., 1998 — Ilościowa analiza mikrostrukturalna w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) gruntów poddanych oddziaływaniu wody. *W: Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych* (red. B. Grabowska-Olszewska): 113–150. Wyd. Nauk. PWN. Warszawa.
- TRZCIŃSKI J., 2003 — Mikrostruktury glin lodowcowych badane w skaningowym mikroskopie elektronowym. *W: Analizy sedymentologiczne osadów glacialogenicznych* (red. M. Harasimiuk, S. Terpiłowski): 63–77. Wyd. UMCS, Lublin.
- TRZCIŃSKI J., 2004 — Combined SEM and computerized image analysis of clay soils microstructure: technique & application. *W: Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference* (red. R.J. Jardine, D.M. Potts, K.G. Higgins): 654–666. Thomas Telford, London.
- UPPOT J.O., STEPHENSON R.W., 1989 — Permeability of clays under organic permeants. *J. Geotech. Engineer., ASCE*, **115**: 115–131.

SUMMARY

In this paper the microstructural characteristic of glacial till from Vistula Glaciation, polluted *in situ* with diesel oil (ON) is presented as well as the analysis of: particle size distribution, Atterberg limits, plasticity index and particle density in relation to the degree of the soil pollution. Polluted soil samples (SR) and unpolluted reference samples (NS) were collected from the area of a fuel terminal located in north-eastern Poland (Fig. 1 and 2). Total hydrocarbon content in polluted soil was 5394,8 mg/kg of dry weight. The microstructural study was conducted on undisturbed soil samples, while the engineering-geological parameters were tested on six soil pastes prepared in laboratory and containing 0, 2, 4, 8, 12, 16% of ON. The particle size distribution was determined using standard pipette method together with the microaggregate composition analysis. The obtained results showed that as the pollution degree increases the content of silt and clay decreases and the content of sand increases (Tab. 1, Fig. 3). A bigger change was observed in the microaggregate analysis. It was revealed that in polluted samples values of

Atterberg limits and plasticity index increased (Tab. 2, Fig. 4 and 5), while the particle density values decreased from 2,68 Mg/m³ (0% ON) to 2,51, Mg/m³ (16% ON) due to adsorption of hydrocarbons on soil particles (Tab. 2, Fig. 6). Microstructural study was conducted using Scanning Electron Microscope (SEM) and STIMAN software for a quantitative analysis of micrographs. The analysis revealed that the examined till has a matrix microstructure. The NS till (Fig. 7A1, B1) is well aggregated and tightly packed. Contacts between microaggregates are of face-to-face (F-F) and edge-to-edge (E-E) types. In the SR till (Fig. 7A2, B2) the clay matrix is less aggregated, structural elements are more loosely packed and edge-to-face (E-F) contacts dominate between microaggregates. The increase of such micromorphological parameters as: total porosity, number of mesopores, pore diameter, pore area and pore perimeter was revealed (Tab. 3). The microstructure converted to more isotropic, which was supported by a decrease in coefficient of anisotropy and number of fissure pores.

