

WŁAŚCIWOŚCI MIKROSTRUKTURALNE ALUWIALNYCH GRUNTÓW ILASTYCH DŁUGOTRWALE ZANIECZYSZCZONYCH PALIWAMI ROPOPOCHODNYMI

MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF ALLUVIAL CLAYEY SOILS POLLUTED WITH PETROLEUM FUELS FOR A LONG PERIOD OF TIME

DOROTA IZDEBSKA-MUCHA¹, JERZY TRZCIŃSKI¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono wyniki badań mikrostruktury aluwialnych gruntów ilastych z terenu lotniska wojskowego w Królewie Malborskim, poddanych wieloletniemu zanieczyszczeniu *in situ* substancjami ropopochodnymi. Dokonano porównawczej analizy mikrostruktury gruntu czystego (NS) i zanieczyszczonego (SR). Badania przeprowadzono z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz programu STIMAN do ilościowej analizy zdjęć z SEM. Grunt NS charakteryzuje się ukierunkowaną mikrostrukturą turbulentną (mikrostrukturą fluidalną), zagregowaną i ciasno upakowaną masą ilastą oraz dominującymi kontaktami typu płaszczyzna-płaszczyzna (F-F) pomiędzy cząstkami i mikroagregatami. Natomiast grunt SR charakteryzuje się mikrostrukturą matrycową, występowaniem stref o luźnym upakowaniu i słabszym zagregowaniu masy ilastej oraz dominacją kontaktów typu płaszczyzna-krawędź (F-E). W gruncie zanieczyszczoneym stwierdzono zmianę rozkładu wielkości i geometrii porów wyrażającą się wzrostem: porowatości, liczby porów, całkowitej i średniej powierzchni porów, całkowitego, średniego i minimalnego obwodu porów, średniej średnicy porów, liczby mezoporów, porów izometrycznych i szczelinowatych oraz spadkiem zawartości mikroporów i porów anizometrycznych.

Słowa kluczowe: mikrostruktura, przestrzeń porowa, ilaste grunty aluwialne, zanieczyszczenia ropopochodne.

Abstract. The paper presents the results of the research on alluvial clay soils from military airport in Królewie Malborskie, polluted with hydrocarbons for a long period of time. Comparative microstructure analysis of polluted samples (SR) and non polluted reference samples (NS) has been conducted. The research was carried out using Scanning Electron Microscope (SEM) and STIMAN software for a quantitative analysis based on SEM micrographs. NS soil is characterized by oriented, turbulent microstructure (fluidal microstructure) and aggregated, tightly packed clay mass. Face-to-face contacts (F-F) dominate between particles and microaggregates. SR soil is characterized by matrix microstructure less aggregated, with some zones of a loosely packed clay mass. Face-to-edge contacts (F-E) dominate between structural elements. It was found that the pore size distribution and pore geometry changed in SR soil. The increase of the following parameters was observed: porosity, pores number, total and average pores area, total, average and minimum pores perimeter, the average pores diameter, the number of mesopores, fissure and isometric pores; but the content of micropores and anisometric pores decreased.

Key words: microstructure, pore space, alluvial clay soils, petroleum pollution.

WSTĘP

Zanieczyszczenia substancjami ropopochodnymi powodują zmiany właściwości fizycznych, mechanicznych i filtracyjnych gruntów niespoistych, jak i spoistych (Fernandez,

Quigley, 1985, 1988; Bowders, Daniel, 1987; Uppot, Stephenson, 1989; Izdebska-Mucha, 2005; Khamehchiyan i in., 2007; Korzeniowska-Rejmer, Izdebska-Mucha, 2006; Singh

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

i in., 2009). Jedną z przyczyn tych zmian jest odmienna charakterystyka właściwości fizyczno-chemicznych substancji ropopochodnych (związków organicznych) w stosunku do wód gruntowych. W gruntach spoistych zmiany te mają charakter bardziej złożony aniżeli w gruntach niespoistych i wynikają między innymi z przebudowy mikrostruktury tych gruntów (Izdebska-Mucha, Trzciniński, 2007, 2008; Izdebska-Mucha i in., 2011).

Na pojęcie mikrostruktura składają się trzy elementy (wg Mitchella, 1976 i Gillotta, 1987 za Grabowską-Olszewską, 1998):

$$\text{struktura (mikrostruktura)} = \text{febrik} + \text{skład gruntu} + \\ + \text{siły działające między cząstkami,}$$

gdzie febrik wyraża rozmiary, kształt, układ ziaren i cząstek oraz charakter i rozkład przestrzeni porowej. Należy sądzić, że przekształcenia będą dotyczyć wszystkich trzech elementów, które wchodzi w skład definicji mikrostruktury.

Stwierdzono jednoznacznie, że niepolarne związki organiczne powodują zmianę sił działających między cząstkami ilastymi. Kaya i Fang (2000, 2005) oraz Anandarajah (2003) na podstawie obliczeń modelowych wykazali, że w środowisku niepolarnych cieczy organicznych maleją siły wzajemnego oddziaływania pomiędzy cząstkami ilastymi. W większym stopniu maleją siły odpychania, w wyniku czego cząstki ilowe ulegają flokulacji. Izdebska-Mucha i in. (2011) potwierdzili te wyniki w bezpośrednich pomiarach sił pomiędzy cząstkami ilastymi o wielkości poniżej 1 μm w mikroskopie sił atomowych (AFM). Autorzy stwierdzili, że pomiędzy cząstkami wyseparowanymi z gliny lodowcowej zanieczyszczonej olejem napędowym siły elektrostatycznego odpychania były mniejsze, a siły adhezji większe niż pomiędzy cząstkami ilastymi pochodzącymi z gliny czystej.

Na podstawie badań modelowych na pastach oraz na gruntach naturalnych zanieczyszczonych *in situ* stwierdzono, że w wyniku zanieczyszczenia gruntu spoistego substancjami ropopochodnymi następuje zmiana rozkładu uziarnienia (Moavenian, Yasrobi, 2008; Izdebska-Mucha, Korze-

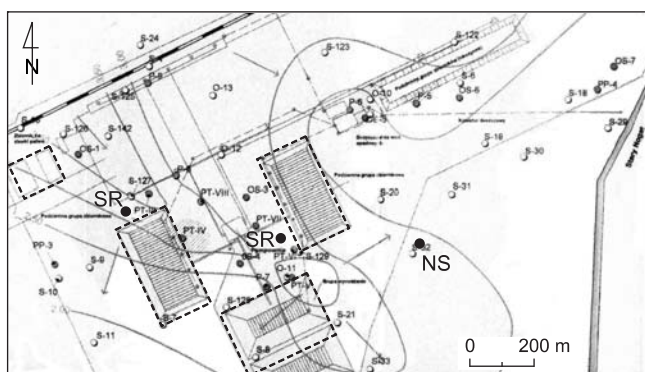
niowska-Rejmer, 2010). Zaobserwowano spadek zawartości frakcji ilowej, a wzrost zawartości frakcji grubszych, tj. pyłowej i/lub piaskowej. Zmiany układu sił i uziarnienia gruntu związane są ze zmianami jego mikrostruktury, niewiele jednak prac poświęconych jest tej problematyce. Berger i in. (2002) badali z zastosowaniem tomografii komputerowej wpływ zanieczyszczeń organicznych na makro- i mikrostrukturę uszczelnień mineralnych. Autorzy zaobserwowali występowanie licznych spękań w uszczelnieniach o wysokiej zawartości frakcji ilowej. Caravaca i Roldan (2003) przeprowadzili ilościową analizę kształtu i wielkości porów w glebie zanieczyszczonej odpadami naftowymi oraz spękań skurczowych w próbkach gleby po wysuszeniu. Stwierdzili, że w glebie zanieczyszczonej wzrosła zawartość porów o średnicy $>400 \mu\text{m}$ oraz porowatość całkowita. W zakresie porów o rozmiarach 50–500 μm wzrosła zawartość porów wydłużonych, a dla porów o średnicy $>500 \mu\text{m}$ zwiększyła się ilość porów zaokrąglonych. W glebie zanieczyszczonej, po wysuszeniu stwierdzono obecność drobniejszych spękań, a w próbkach czystych ich brak. Izdebska-Mucha i Trzciniński (2007, 2008) oraz Izdebska-Mucha i in. (2011) przedstawili analizę ilościową i jakościową zmiany mikrostruktury gliny lodowcowej zanieczyszczonej *in situ* olejem napędowym. Na podstawie zdjęć wykonanych w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) oraz ilościowej analizy obrazu tych zdjęć przedstawili charakterystykę parametrów morfometrycznych i geometrycznych mikrostruktury gruntu czystego i zanieczyszczonego. Stwierdzili m.in. zmiany rozkładu porowatości i kształtu porów, reorientację elementów strukturalnych oraz spadek anizotropii struktury.

Zagadnienia wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na mikrostrukturę gruntu są wciąż w niewielkim stopniu rozpoznane. Wymagają one dalszych badań z uwzględnieniem różnych typów granulometrycznych gruntów, czasu ich zanieczyszczenia oraz rodzaju tego zanieczyszczenia. Niniejsza praca stanowi kolejny krok w badaniach nad tymi zagadnieniami i dotyczy gruntu bardzo spoistego, poddanego zanieczyszczeniu w długim, kilkudziesięcioletnim okresie.

CHARAKTERYSTYKA BADANEGO GRUNTU

Analizowany grunt pochodzi z terenu lotniska wojskowego w Królewie Malborskim (6 km na wschód od Malborka). Lotnisko istnieje od lat 30. ubiegłego wieku, a w jego obrębie znajduje się infrastruktura związana z magazynowaniem, przesyłem i dystrybucją paliwa lotniczego i samochodowego. W sąsiedztwie wymienionych obiektów występowało wieloletnie zanieczyszczenie podłoża gruntowego użytkowanymi paliwami. Tereny skażone są stopniowo poddawane oczyszczaniu i rekultywacji. Grunt do badań pobrano z głębokości 1,5–2,0 m z terenu zanieczyszczonego (przed likwidacją skażenia) – próbki oznaczone symbolem SR, oraz

z sąsiadującego obszaru nie objętego skażeniem – próbki oznaczone symbolem NS (fig. 1, 2). Według Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1:50 000, arkusz Malbork (Rabek, Młyńczak, 2007) analizowany grunt to holocenijskie ilaste osady dolin rzecznych. Skład mineralny, stopień zanieczyszczenia oraz wartości podstawowych parametrów geologiczno-inżynierskich gruntu czystego i zanieczyszczonego przedstawiono w tabeli 1. Metodologię badań i obliczeń przyjęto zgodnie z normą PN-88/B-04481 lub jeśli inaczej – zamieszczono w objaśnieniach pod tabelą.



SR grunt zanieczyszczony
polluted soil

NS grunt niezanieczyszczony
unpolluted soil

▭ obiekty związane z magazynowaniem i dystrybucją paliw
buildings related to fuels distribution and storing

Fig. 1. Fragment mapy sytuacyjnej bazy paliwowej lotniska wojskowego w Królewie Malborskim; lokalizacja miejsc pobrania próbek gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego substancjami ropopochodnymi (SR)

A map fragment of a military airport in Królewie Malborskie; location of sampling sites: NS – unpolluted soil, SR – soil polluted with petroleum substances



Fig. 2. Profil litologiczny osadów w miejscu pobrania próbek

The lithological profile of the subsoil at the sampling site

Tabela 1

Skład mineralny, stopień zanieczyszczenia oraz podstawowe parametry geologiczno-inżynierskie gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego (SR)

Mineralogical composition, pollutant content and basic geological engineering properties of unpolluted (NS) and polluted soil (SR)

Parametry	Grunt niezanieczyszczony NS	Grunt zanieczyszczony SR
Zanieczyszczenie ¹ [mg/kg suchej masy]	nie zawiera zanieczyszczeń	P1) benzyny C ₆ -C ₁₂ : 705; oleje >C ₁₂ : 226; Σ 931 P2) benzyny C ₆ -C ₁₂ : 223; oleje >C ₁₂ : 50; Σ 273
Skład granulometryczny ² i nazwa gruntu	f _p 2%; f _π 47%; f _i 51% ił	f _p 2%; f _π 67%; f _i 31% ił pylasty
Skład mineralny ³	beidelit 38%, kaolinit 12%, kwarc i in. 48%, subst. org. 2%	–
Wilgotność naturalna [%]	44	29
Gęstość objętościowa gruntu ⁴ [Mg/m ³]	1,73	1,83
Gęstość właściwa szkieletu gruntowego ⁵ [Mg/m ³]	2,65	2,65
Granica plastyczności [%]	40	33
Granica płynności ⁶ [%]	79	64
Wskaźnik plastyczności [%]	39	31
Stopień plastyczności [-]	0,10	-0,13

P1, P2 – numery próbek / sample number

¹ analiza chromatograficzna / chromatographic analysis

² analiza mikroagregatowa (metodyka wg Myślińskiej, 2010) / microaggregate analysis

³ metoda DTA (obliczenia ilościowe wg Wyrwickiego, 1988, 1996) / DTA method, quantitative analysis according to Wyrwicki (1988, 1996)

⁴ metoda wyporu hydrostatycznego w ciekłej parafinie / liquid paraffin displacement method

⁵ metoda piknometru gazowego, aparat Accu Pyc 1330 (Micromeritics, USA) / gas pycnometer method, apparatus Accu Pyc 1330 (Micromeritics, USA)

⁶ metoda penetrometru stożkowego wg BS1377: Part 2: 1990: 4.3 / cone penetrometer method according to BS1377: Part 2: 1990: 4.3

METODYKA BADAŃ

Badania mikrostrukturalne wykonano dla próbek gruntu niezanieczyszczonego – NS i zanieczyszczonego substancjami ropopochodnymi – SR. Metodykę ilościowej analizy mikrostrukturalnej z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) szczegółowo przedstawiono w pracach Trzcinińskiego (1998, 2004). Z monolitów wycięto niewielkie próbki w formie prostopadłościennych kostek o objętości od 0,7 do 1,0 cm³. Kostki poddano specjalnej procedurze niskotemperaturowego suszenia przez sublimację w próżni. Z wysuszonych próbek przygotowano preparaty i poddano je jakościowej i ilościowej analizie mikrostrukturalnej.

W analizie jakościowej scharakteryzowano elementy strukturalne szkieletu mineralnego, a w ilościowej wykona-

no pomiary w zakresie morfometrycznych i geometrycznych parametrów przestrzeni porowej. Zastosowano klasyfikację porów ze względu na ich wielkość oraz kształt wg Grabowskiej-Olszewskiej i in. (1984). Analizę jakościową wykonano na podstawie dokumentacji fotograficznej przy powiększeniach od 50x do 6500x, na sześciu obszarach dla każdej z próbek. Do badań zastosowano mikroskop SEM, model Jeol JSM 6380LA. Analizę ilościową przeprowadzono z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania STIMAN do analizy obrazów mikroskopowych (Sokolov i in., 2002).

Badania wykonano w Laboratorium Skaningowej Mikroskopii Elektronowej i Mikroanalizy Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

PORÓWNAWCZA ANALIZA MIKROSTRUKTURALNA BADANYCH GRUNTÓW

CHARAKTERYSTYKA JAKOŚCIOWA

Grunt niezanieczyszczony NS (fig. 3, A1) charakteryzuje się mikrostrukturą turbulentną (wg klasyfikacji Sergeyeva i in., 1978, 1980; Grabowskiej-Olszewskiej i in., 1984), o wyraźnie ukierunkowanym charakterze (mikrostruktura fluidalna wg nomenklatury Ruszczyńskiej-Szenajch i Trzcinińskiego, 2009). Masa ilasta tworzy ukierunkowane „strumienie” o orientacji poziomej i prawie poziomej (prawa górna część fotografii) oraz skośnej (od lewej górnej do prawej dolnej części fotografii). Strumienie oddzielone są i podkreślone wyraźnymi szczelinami (grube strzałki) o przebiegu zbliżonym do orientacji strumieni. Wyróżniają się duże (100–200 μm), anizometryczne pory (cienkie strzałki), zorientowane dłuższą osią zgodnie z przebiegiem „strumieni”. Masa ilasta jest ciasno upakowana i wyraźnie zorientowana (B1). Dobrze widoczne są szczeliny (grube strzałki) o orientacji podobnej jak szczeliny na fotografii A1 oraz anizometryczne agregaty (obwiedzione przerywaną linią) o średnicy od 100 do 150 μm, również o podobnej orientacji dłuższej osi jak szczeliny na fotografii A1. Fotografia C1 ilustruje zagregowaną masę ilastą o skośnej orientacji, takiej jak orientacja szczelin na fotografii A1 i B1 oraz wyraźne, anizometryczne agregaty (część agregatu z fotografii B1 obwiedziono przerywaną linią) i mikroagregaty o średnicy do 20 μm. Fotografia D1 przedstawia ciasno upakowane mikroagregaty ilaste o orientacji cząstek wg kontaktów typu płaszczyzna-płaszczyzna (F-F) – cienkie strzałki. Pomiedzy mikroagregatami dominują duże, szczelinowate mikropory o średnicy dłuższej osi do 10 μm (lewa górna gruba strzałka) oraz mniejsze, o średnicy około 1 μm, izometryczne mikropory (pozostałe grube strzałki).

Grunt zanieczyszczony SR (fig. 3, A2) charakteryzuje się mikrostrukturą matrycową (wg klasyfikacji Sergeyeva i in., 1978, 1980; Grabowskiej-Olszewskiej i in., 1984). Masa ilasta (matryca) rozłożona jest równomiernie i bezładnie, bez wyraźnej orientacji elementów strukturalnych.

Słabo zaznaczają się skośne powierzchnie nieciągłości o przebiegu od lewej górnej do prawej dolnej części fotografii (kropkowane linie), podobnie jak szczeliny w próbce gruntu niezanieczyszczonego na fotografii A1. Widoczne są nieliczne anizometryczne pory o średnicy mniejszej od 100 μm (grube strzałki) oraz pory szczelinowate (cienkie strzałki). Masa ilasta jest ciasno upakowana, lecz słabo zorientowana (B2). W niektórych miejscach widoczne jest luźniejsze upakowanie matrycy ilastej. Słabo zaznaczone są krótkie szczeliny o poziomym lub prawie poziomym przebiegu (grube strzałki). Występują pojedyncze izometryczne agregaty o średnicy do 50 μm (obwiedziony przerywaną linią). Masa ilasta jest słabiej zagregowana (C2) aniżeli w próbce gruntu niezanieczyszczonego (C1) i nieorientowana. Nielicznie występują mikroagregaty ilaste o średnicy do 10 μm i o orientacji cząstek ilastych wg kontaktów typu płaszczyzna-płaszczyzna (F-F) – grube strzałki. W niektórych mikroagregatach ilastych cząstki są zorientowane wg kontaktów typu płaszczyzna-krawędź (F-E) i krawędź-krawędź (E-E) – cienkie strzałki. Na fotografii D2 widoczne są luźno upakowane mikroagregaty ilaste, pomiędzy którymi występują mikropory o zróżnicowanej wielkości o średnicy od 1 do 5 μm średnicy (grube strzałki). Cząstki i mikroagregaty ilaste kontaktują się głównie wg typu płaszczyzna-krawędź (F-E) – cienkie strzałki.

CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW ILOŚCIOWYCH

Stwierdzono wyraźne różnice w wartościach parametrów morfometrycznych i geometrycznych pomiędzy gruntem niezanieczyszczonym (NS) i zanieczyszczonym (SR) substancjami ropopochodnymi (tab. 2). Wartość średnia porowatości wzrosła od 22,4% dla gruntu NS do 25,3% dla gruntu SR. Podobna tendencja widoczna jest dla wartości liczby porów. Wzrosła również wartość całkowitej i średniej powierzchni

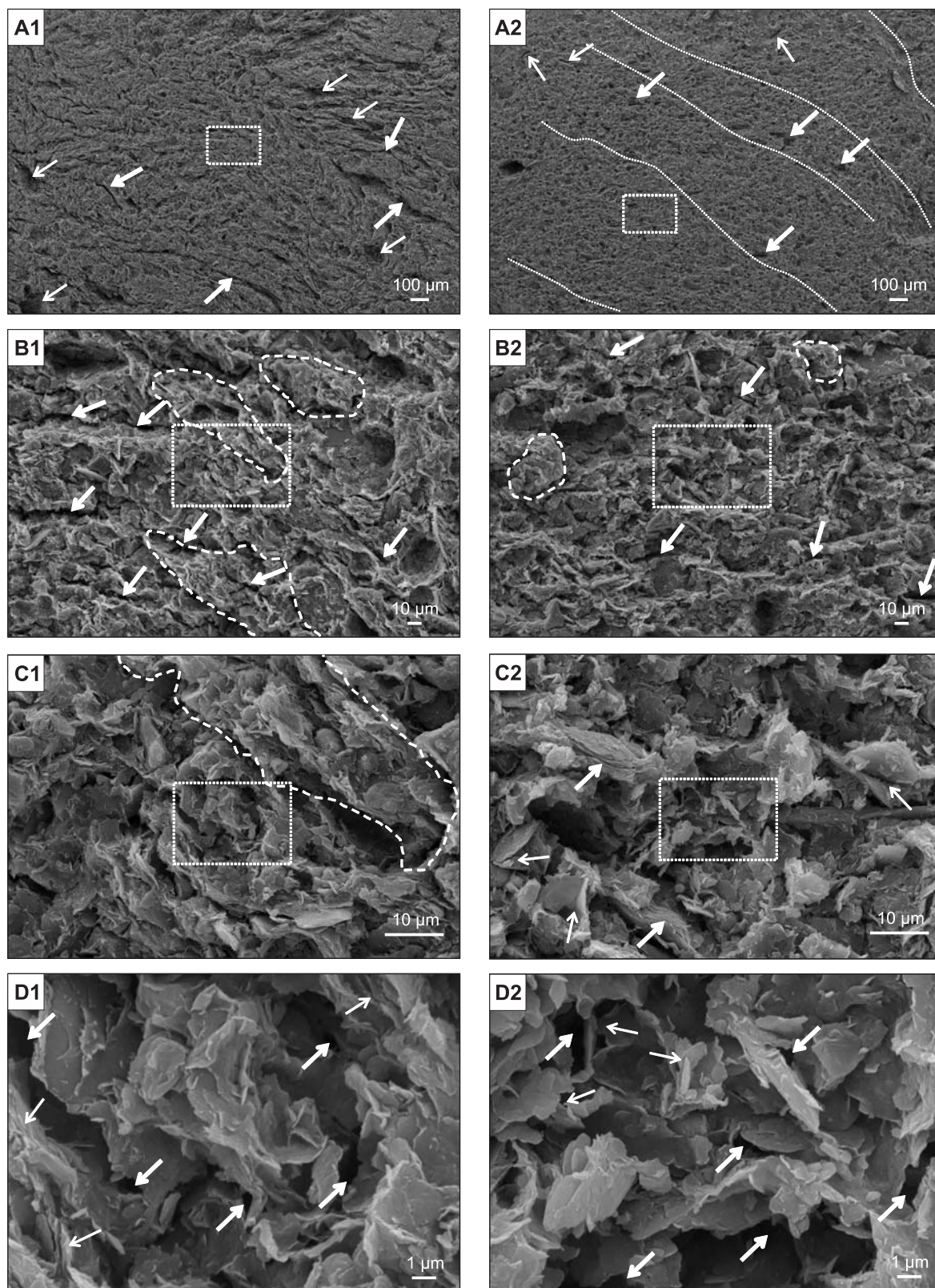


Fig. 3. Mikrostruktura gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego (SR) substancjami ropopochodnymi

A1, B1, C1 i D1 – grunt NS; A2, B2, C2 i D2 – grunt SR. Powiększenie fotografii: A1, A2 – 50x, B1, B2 – 400x, C1, C2 – 1600x, D1, D2 – 6500x. Prostokątna obwiednia (kropkowana linia) – obszar powiększony na następnej fotografii. Szczegółowy opis mikrostruktur w tekście

Microstructure of unpolluted soil (NS) and soil polluted with petroleum substances (SR)

A1, B1, C1, D1 – NS soil, A2, B2, C2, D2 – SR soil. Magnification of the photographs: A1, A2 – 50x, B1, B2 – 400x, C1, C2 – 1600x, D1, D2 – 6500x. Rectangular border (dotted line) – area magnified in the next photograph. Detailed description of the microstructures in the text

Tabela 2

Ilościowe parametry mikrostrukturalne gruntu niezanieczyszczonego (NS) i zanieczyszczonego (SR) związkami ropopochodnymi

Quantitative microstructural parameters of unpolluted soil (NS) and soil polluted with petroleum substances (SR)

Parametry mikrostruktury	Grunt niezanieczyszczony NS ¹						Grunt zanieczyszczony SR ¹					
	min	max	średnia	odch. stand.	współcz. zmienności [%]		min	max	średnia	odch. stand.	współcz. zmienności [%]	
Porowatość n [%]	21,7	22,7	22,4	0,37	2		23,7	27,4	25,3	1,38	5	
Liczba porów $N \times 10^3$	121	168	134	18075	13		82	202	137	39051	29	
Całkowita powierzchnia porów $S_t \times 10^3$ [μm^2]	499	527	518	10017	2		546	635	584	33190	6	
Maksymalna powierzchnia porów S_{max} [μm^2]	6819	12132	9718	2363	24		6380	10528	7882	1452	18	
Minimalna powierzchnia porów S_{min} [μm^2]	0,07	0,07	0,07	0	0		0,07	0,07	0,07	0	0	
Średnia powierzchnia porów S_{av} [μm^2]	3,12	4,34	3,90	0,45	11		2,94	6,67	4,54	1,22	27	
Całkowity obwód porów $P_t \times 10^3$ [μm]	897	1087	973	65567	7		828	1301	1063	151926	14	
Maksymalny obwód porów P_{max} [μm]	2303	3530	2746	514	19		1949	3538	2552	594	23	
Minimalny obwód porów P_{min} [μm]	1,23	1,58	1,42	0,16	11		1,32	1,58	1,48	0,08	6	
Średni obwód porów P_{av} [μm]	6,46	8,15	7,31	0,69	9		6,45	10,10	8,04	1,22	15	
Maksymalna średnica porów D_{max} [μm]	93	124	110	14	13		90	116	100	9	9	
Minimalna średnica porów D_{min} [μm]	0,28	0,31	0,30	0,01	3		0,30	0,30	0,30	0	0	
Średnia średnica porów D_{av} [μm]	0,90	1,10	0,98	0,08	8		0,89	1,30	1,06	0,14	13	
Mikropory [%]	32	40	35	3	9		29	37	33	3	9	
Mezopory [%]	60	68	65	3	5		63	71	67	3	5	
Maksymalny współczynnik formy porów K_{fmax} [-]	0,92	0,99	0,95	0,03	3		0,91	0,99	0,94	0,03	3	
Minimalny współczynnik formy porów K_{fmin} [-]	0	0,08	0,02	0,037	183		0	0,04	0,0067	0,016	245	
Średni współczynnik formy porów K_{fav} [-]	0,39	0,47	0,43	0,03	8		0,39	0,44	0,43	0,02	4	
Pory izometryczne [%]	8,6	19,0	13,0	4,8	37		10,8	17,6	13,7	2,7	20	
Pory anizometryczne [%]	81,0	91,4	86,5	4,7	5		82,1	88,9	85,4	2,4	3	
Pory szczełinowate [%]	0	1,4	0,5	0,57	115		0,2	1,9	0,9	0,80	87	
Wskaźnik anizotropii mikrostruktury K_a [%]	12	33	24	9	35		11	36	25	8	32	

¹ liczba analiz / number of analysis – 6

oraz całkowitego, średniego i minimalnego obwodu porów, jak również średniej średnicy porów w stosunku do gruntu NS. Zaszły również istotne zmiany w rozkładzie wielkości porów. Zmniejszyła się zawartość mikroporów, a wzrosła mezoporów w gruncie SR. Analiza kształtu porów i ich orientacji wykazała również zmiany, ale są one mniej wyraźne.

Zwiększyła się nieznacznie zawartość porów izometrycznych i szczelinowatych, a zmniejszyła porów anizometrycznych w gruncie SR. Wartość średniego współczynnika formy porów nie uległa zmianie, a wskaźnik anizotropii mikrostruktury nieznacznie wzrósł w gruncie SR.

PODSUMOWANIE

Substancje ropopochodne ze względu na odmienną charakterystykę właściwości fizyczno-chemicznych w stosunku do wody powodują zmiany parametrów fizycznych, mechanicznych i filtracyjnych gruntów. Zmiany te wynikają głównie z przebudowy mikrostruktury gruntów. Badane grunty to holoceniowe ilaste osady dolin rzecznych, pochodzące z terenu lotniska wojskowego w Królewie Malborskim, które podlegały wieloletniemu zanieczyszczeniu paliwami ropopochodnymi. Określono skład mineralny, stopień zanieczyszczenia oraz wartości podstawowych parametrów geologiczno-inżynierskich gruntu czystego (NS) i zanieczyszczonego substancjami ropopochodnymi (SR). Próbkę obu rodzajów gruntu poddano także jakościowej i ilościowej analizie mikrostrukturalnej. Analizę jakościową przeprowadzono na podstawie dokumentacji fotograficznej wykonanej z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Natomiast analizę ilościową przeprowadzono przy użyciu specjalistycznego oprogramowania STIMAN do analizy obrazów mikroskopowych.

Grunt NS charakteryzuje się mikrostrukturą turbulentną o ukierunkowanym charakterze (mikrostruktura fluidalna), z wyraźnymi szczelinami o przebiegu zbliżonym do orientacji „strumieni” materiału ilastego. Masa ilasta jest zagregowana i ciasno upakowana. Cząstki i mikroagregaty ilaste zorientowane są wg kontaktów typu płaszczyzna-płaszczyzna (F-F).

Grunt SR charakteryzuje się mikrostrukturą matrycową bez wyraźnej orientacji elementów strukturalnych. Masa ilasta jest ciasno upakowana. W niektórych miejscach widoczne jest luźniejsze jej upakowanie i słabsze zagregowanie. Mikroagregaty ilaste kontaktują się głównie wg typu płaszczyzna-krawędź (F-E).

Wzrosła porowatość, liczba porów, całkowita i średnia powierzchnia oraz całkowity, średni i minimalny obwód porów, jak również średnia średnica porów w gruncie SR w stosunku do gruntu NS. Zmniejszyła się zawartość mikroporów i porów anizometrycznych, a wzrosła mezoporów, porów izometrycznych i szczelinowatych w gruncie zanieczyszczonym (SR).

LITERATURA

- ANANDARAJAH A., 2003 — Mechanism controlling permeability change in clays due to changes in pore fluids. *J. Geotech. Geoenviron. Engineer.*, **129**, 2: 163–172.
- BERGER W., KALBE U., GOEBBELS J., 2002 — Fabric studies on contaminated mineral layers in composite liners. *Appl. Clay Sci.*, **21**: 89–98.
- BOWDERS J.J., DANIEL D.E., 1987 — Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *J. Geotech. 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.
- FERNANDEZ F., QUIGLEY R. M., 1988 — Viscosity and dielectric constant controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water-soluble organics. *Canad. Geotech. J.*, **25**: 582–589.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., 1998 — Osiadanie zapadowe. *W: Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych* (red. B. Grabowska-Olszewska): 71–83. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V. I., SOKOLOV V. N., 1984 — Atlas of the microstructure of clay soils. Państw. Wyd. Nauk., Warszawa.
- IZDEBSKA-MUCHA D., 2005 — Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na wybrane geologiczno-inżynierskie właściwości gruntów spoistych. *Prz. Geol.*, **53**, 9: 766–769.
- IZDEBSKA-MUCHA D., KORZENIOWSKA-REJMER E., 2010 — Selected characteristics of clay soils polluted by petroleum substances in the context of their barrier properties. *W: Proc. of the 6th Intern. Congress on Environmental Geotechnics* (red. R.K. Manoj Datta, G.V. Srivastava, Ramana J.T. Shahu): 705–710. Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Delhi, India.
- 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., ŻBIK 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.
- KAYA A., FANG H.-Y., 2005 — Experimental evidence of reduction in attractive and repulsive forces between clay particles permeated with organic liquids. *Canad. Geotech. J.*, **42**: 632–640.
- KHAMEHCHIYAN M., CHARKHABI A.H., TAJIK M., 2007 — Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineer. Geol.*, **89**: 220–229.
- KORZENIOWSKA-REJMER E., IZDEBSKA-MUCHA D., 2006 — Ocena wpływu zanieczyszczeń ropopochodnych na uziarnienie i plastyczność gruntów spoistych. *Inż. i Ochr. Środ., PAN*, **9**, 1: 89–103.
- MOAVENIAN M.H., YASROBI S.S., 2008 — Volume change behaviour 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.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- RABEK W., MŁYŃCZAK A., 2007 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Malbork. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- RUSZCZYŃSKA-SZENAJCH H., TRZCIŃSKI J., 2009 — Soft lodgement till deposition and syndepositional deformation, Anielinek, the Polish Lowlands. *Canad. J. Earth Sci.*, **46**: 67–82.
- SERGEYEV Y.M., GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N., 1978 — Types of the microstructures of clayey soils. Proc. of the III Intern. Congress IAEG: 319–327.
- SERGEYEV Y.M., GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N., KOLOMENSKI Y.N., 1980 — The classification of microstructures of clay soil. *Journal of Microscopy*, **120**: 237–260.
- 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., 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., 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.
- WYRWICKI R., 1988 — Analiza derywatograficzna skał ilastych. Wyd. UW, Warszawa.
- WYRWICKI R., 1996 — Analiza derywatograficzna. *W: Metodyka badań kopaliny ilastych* (red. H. Kościółko, R. Wyrwicki). Państw. Inst. Geol., Warszawa–Wrocław.

SUMMARY

Petroleum pollution, due to the difference in physico-chemical characteristic between water and hydrocarbons, causes several changes in physical, mechanical and filtration properties of soils. The main reason of these changes is a soil microstructure transformation. The term *microstructure* refers to: 1) fabric – particle size and shape, arrangement of particles, particle groups and pore space, 2) the soil composition, and 3) interparticle forces. The soil microstructure transformation will affect to all three elements. Non-polar organics cause changes in particle interactions and particle size distribution, which in turn lead to the rearrangement of the soil microfabric.

The analyzed soils represent clayey alluvial sediments (Holocene). They were collected from a military airport area in Królewie Malborskie (Fig. 1 and Fig. 2). The soils have been polluted with petroleum fuels for a long period of time (a few dozens of years). Mineralogical composition, hydrocarbon content and basic geological engineering parameters were determined for polluted samples – SR and non polluted reference samples – NS (Table 1). The qualitative microstructural analysis of non polluted and polluted samples was

based on micrographs (Fig. 3) obtained from Scanning Electron Microscope (SEM). The quantitative analysis based on SEM micrographs was conducted using STIMAN software.

The NS soil has an oriented, turbulent microstructure (fluidal microstructure), that contains distinct fissures elongated in accordance to the clay matrix orientation (Fig. 3: A1, B1, C1, D1). The clay matrix is well aggregated and densely packed. The contacts between particles and microaggregates are of face-to-face type (F-F). The SR soil has a matrix microstructure with no distinct orientation of structural elements (Fig. 3: A2, B2, C2, D2). The clay matrix is also densely packed, but there are some areas where the matrix is loosely packed and less aggregated. The contacts between particles and microaggregates are of face-to-edge type (F-E). In the SR soil the increase of: porosity, number of pores, total and average pore area, total, average and minimum pore perimeter, average pore diameter was observed. The number of micropores and anisometric pores decreased, while the number of mesopores, isometric and fissure pores increased in the SR soil in comparison with the NS soil (Table 2).