

Ilościowa analiza mikrostrukturalna w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) typowych gruntów Polski

Ryszard Kaczyński*, Jerzy Trzciniński*

Mikrostruktura jest jednym z najistotniejszych czynników określających właściwości gruntów. Pierwsze próby opisu mikrostruktury gruntów spoistych przeprowadził Terzaghi (1925), Goldsmidt (1926), Casagrande (1932), Filatov (1936) i inni. W następnych latach wielu badaczy angażowało się w badania mikrostruktur gruntów dla celów geologiczno-inżynierskich.

Prawdziwym przełomem w badaniu struktur różnych materiałów było zastosowanie skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Do badań mikrostruktur gruntów po raz pierwszy w 1967 r. zastosował tego typu mikroskop Roscoe z Uniwersytetu w Cambridge (Grabowska-Olszewska, 1990).

Od 1968 r. Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej prowadzi we współpracy z Katedrą Gruntoznawstwa i Geologii Inżynierskiej Państwowego Uniwersytetu Moskiewskiego (MGU) systematyczne badania mikrostrukturalne głównie gruntów spoistych przy zastosowaniu SEM-u.

W odniesieniu do badań mikrostrukturalnych polskich gruntów przy użyciu SEM-u, były prowadzone prace na szeroką skalę przez Grabowską-Olszewską (1971, 1975, 1977, 1982, 1983, 1988). Podsumowaniem jakościowych badań mikrostrukturalnych jest monografia *Atlas of the microstructure of clay soils* (Grabowska-Olszewska i in., 1984).

Dalszy postęp w rozwoju badań mikrostrukturalnych (Smart, 1973; Sokolov i in., 1980; Love & Derbyshire, 1985; Osipov i in., 1989; Sokolov, 1990) umożliwił także ilościową analizę mikrostrukturalną gruntów. Ilościowa analiza obejmuje poza jakościowym obrazem mikrostruktury ilościową ocenę morfometryczną i geometryczną jej elementów. Możliwe jest to przy wykorzystaniu systemu SEM — komputer z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania, które rejestruje i analizuje obrazy. Jednym z takich systemów jest program STIMAN (*Structural Image Analysis*), który został opracowany i wdrożony w MGU w zespole Sokolova (Sergeev i in., 1983, 1984).

Pierwsze ilościowe analizy mikrostrukturalne gruntów polskich w Instytucie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW rozpoczęto w 1990 r. Najpierw wykonywano je w laboratorium w Państwowym Uniwersytecie Moskiewskim (MGU), a następnie od 1994 r. w laboratorium naszego instytutu w Warszawie. Stało się to możliwe dzięki funduszom otrzymanym z KBN-u 3P403 008 06 (Kaczyński, 1994), z których zakupiono procesor, kartę graficzną i oprogramowanie STIMAN (wersja 2.07) wraz z licencją. Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego obecnie ma osobne stanowisko do badań mikrostrukturalnych. W okresie ostatnich kilku lat skatalogowano już ok. 220 ilościowych analiz gruntów polskich o różnej genezie i litologii. Część badań była już publikowana, np. wyniki dla glin zwałowych (Kaczyński & Trzciniński, 1990; Kaczyński & Trzciniński, 1992; Trzciniński, 1993, 1995, 1997), ilów glacialimnicznych (Czajka, 1992, 1994; Barański & Czajka, 1995) oraz ilów zastoisowych (Kaczyński i in., 1993).

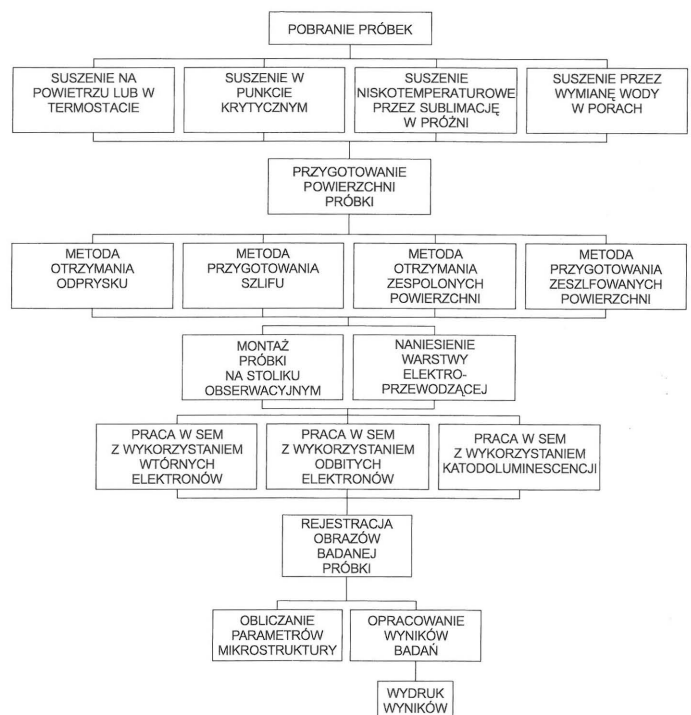
Przeprowadzone badania wstępnie potwierdzają istnienie zależności pomiędzy parametrami mikrostrukturalnymi a właściwościami (przede wszystkim fizycznymi) i składem mineralnym. Istnieje pilna potrzeba prowadzenia dalszych badań w kierunku poszukiwania możliwości prognozowania właściwości gruntu na podstawie wyników analizy ich mikrostruktury. Duża liczba badań podstawowych typów genetycznych gruntów Polski pozwoli w przyszłości opracować atlas ich mikrostruktur na podstawie analiz ilościowych oraz prawdopodobnie wyznaczyć zależności pomiędzy parametrami mikrostruktury a właściwościami gruntu.

Dalszy rozwój badań mikrostrukturalnych gruntów zmierza do stosowania takiej aparatury SEM, aby próbki gruntu, a w szczególności ich struktura nie była narażona na jakiegokolwiek zmiany podczas przygotowywania ich do badania, tzn. aby warunki badania były zbliżone do warunków naturalnych przy zmieniającej się wilgotności i ciśnieniu atmosferycznym. Takie możliwości stwarza aparatura Elektroscan Environmental SEM czyli ESEM (Baker i in., 1993, 1995).

Metodyka badań

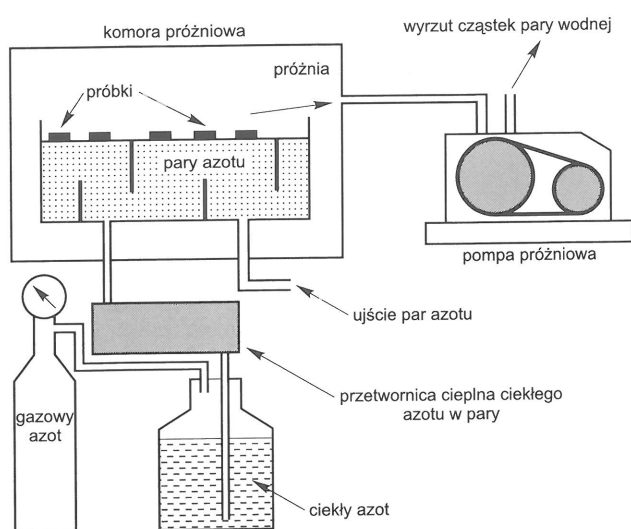
Przystępując do ilościowej analizy mikrostrukturalnej gruntów w skaningowym mikroskopie elektronowym należy szczególną uwagę zwrócić na następujące czynności:

— sposób wysuszenia próbek gruntów wilgotnych nie może zniekształcać ich rzeczywistej mikrostruktury,



Ryc. 1. Schemat ilościowej analizy mikrostrukturalnej w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM)

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa



Ryc. 2. Schemat suszenia niskotemperaturowego przez sublimację w próżni

— przygotowanie powierzchni próbki do analizy należy przeprowadzić w taki sposób, aby nie nastąpiło zniszczenie mikrostruktury.

Przebieg ilościowej analizy mikrostrukturalnej w skaningowym mikroskopie elektronowym od momentu pobrania próbki do uzyskania wyników przedstawiono na schemacie (ryc. 1).

Suszenie próbek. Wybierając i przygotowując próbki do ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM prawie zawsze mamy do czynienia z gruntami o pewnej wilgotności. Zawartość wody oraz

obecność minerałów ilastych to czynniki wpływające na skurcz gruntu podczas suszenia. Dlatego też należy wysuszyć grunt w taki sposób, aby nie nastąpiły w nim liniowe i objętościowe zmiany. W tych przypadkach najlepiej zastosować suszenie niskotemperaturowe przez sublimację w próżni, którego schemat przedstawia ryc. 2.

Jest to najbardziej rozpowszechniona i dająca najlepsze rezultaty metoda suszenia wilgotnych gruntów przygotowywanych do badań mikrostrukturalnych w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM). Prostopadłościenną próbkę o wymiarach 10 x 7 x 7 mm wycina się z gruntu, a następnie zamraża. Podstawą jest szybkie (szokowe) zamrożenie wilgotnej próbki w ciekłym azocie (temperatura wrzenia ok. $-196^{\circ}\text{C} = \text{ok. } 77^{\circ}\text{K}$). Przy tej temperaturze znajdująca się w porach próbki woda przechodzi w stan stały w sposób natychmiastowy. Wyklucza to powstawanie grubych kryształów lodu zwiększających swoją objętość, które mogłyby zniszczyć jej mikrostrukturę.

Eksperymentalne dane (Smart & Tovey, 1981, 1982; Osipov i in., 1989) potwierdziły, że **suszenie niskotemperaturowe przez sublimację w próżni** jest metodą, która zachowuje nienaruszoną strukturę gruntu.

Przygotowanie powierzchni próbek. Powierzchnia próbki przygotowywana do ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM powinna być równa i w jak najmniejszym stopniu pozbawiona wystających części i wyszczerbień. Tylko taka powierzchnia dać będzie wyraźne granice między porami i cząstkami w obrazie mikroskopowym.

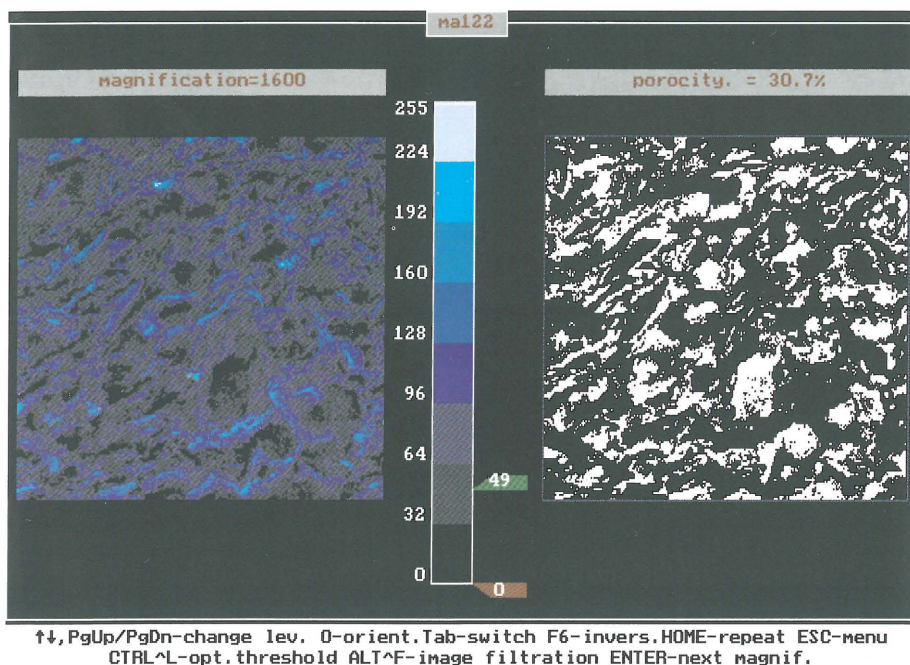
Istnieje wiele metod, które pozwalają otrzymać płaskie powierzchnie (ryc. 1). Zastosowanie jednej z nich zależy głównie od stopnia zaawansowania procesu lityfikacji czyli od trwałości i wytrzymałości wiązań pomiędzy elementami strukturalnymi.

Najprostszym sposobem przygotowania płaskiej powierzchni do ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM jest zeszlifowanie powierzchni próbki na płaszczyźnie ściernej, a następnie dokonanie jej oczyszczenia taśmą adhezyjną.

Tab. 1. Wyniki ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM dla typowych gruntów Polski

Parametry mikrostruktury	Grunty									
	ił mioceniński	ił plioceniński	głina zwałowa*1	głina zwałowa*2	głina zwałowa*3	ił glacialimiczny	less	piasek rzeczny	zwietrz. iłu miocenińskiego	sztuczny (popiół z elektrowni)
Porowatość n [%]	32,9	34,52	29,5	37,1	41,0	40,1	40,6	47,6	57,6	55,9
Liczba porów N [1×10^3]	5,9	30,0	8,7	125,4	313,4	36,7	7,7	0,2	12,9	3,7
Średnia średnica porów D_{av} [μm]	1,01	1,53	2,43	0,21	0,12	0,30	2,23	30,14	0,87	2,40
Całkowity obwód porów P_t [$1 \times 10^3 \mu\text{m}$]	37,8	344,3	144,0	264,8	346,7	89,8	117,4	41,8	83,3	59,5
Średni obwód porów P_{av} [μm]	6,40	11,46	16,49	2,11	1,11	2,45	15,20	197,94	6,48	16,00
Całkowita powierzchnia porów S_t [$1 \times 10^3 \mu\text{m}^2$]	12,3	191,2	121,7	24,5	29,6	11,2	170,0	327,8	63,7	53,9
Średnia powierzchnia porów S_{av} [μm^2]	2,08	6,37	13,93	0,20	0,09	0,31	22,0	1553,74	4,95	14,51
Średni współczynnik formy porów K_{fav} [-]	0,465	0,442	0,553	0,553	0,503	0,395	0,563	0,379	0,548	0,602
Stopień anizotropii mikrostruktury K_a [%]	56,1	24,1	17,9	16,6	4,8	45,0	10,9	27,0	33,8	7,2
Orientacja mikrostruktury alfa [$^{\circ}$]	29,2	32,8	95,8	63,3	23,1	175,8	89,7	75,9	18,5	88,7
Współczynnik filtracji k [mδ]	0,0247	0,3190	0,1876	0,0375	0,0556	0,0067	0,7883	0,9737	0,2394	0,1074
Parametry fizyczne w stanie naturalnym										
Wilgotność w_n [%]	20,0	24,0	8,2	16,9	14,8	29,6	10,2	7,3	32,5	47,9
Gęstość objętościowa gruntu ρ [Mg/m^3]	2,16	2,05	2,13	2,06	1,80	1,90	1,80	1,63	1,72	1,10
Porowatość n [%]	33,4	38,5	26,4	38,2	41,1	47,0	38,0	42,6	51,5	50,0
Skład granulometryczny [%], (frakcja): piaskowa f_p	7	1	61	14	52	8	11	96	2	85
pyłowa f_{π}	54	48	23	57	29	42	77	4	53	15
iłowa f_i	39	51	16	29	19	50	12	—	45	—
Granica plastyczności w_p [%]	28,5	32,5	13,7	16,6	14,1	26,5	11,0	—	33,5	—
Granica płynności w_L [%]	65,0	61,0	25,4	29,4	29,0	64,4	18,7	—	71,0	—

*— ablacyną z wytopienia, 1 — złodowacenie południowopolskie, 2 — złodowacenie środkowopolskie, 3 — złodowacenie północnopolskie



Ryc. 3. Przykład zarejestrowanego w programie STIMAN obrazu próbki iltu mioceńskiego obserwowanego w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM)

Warunki pracy skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Po prawidłowym przygotowaniu próbki do właściwych badań, kolejnym warunkiem osiągnięcia rzeczywistych parametrów mikrostruktury jest otrzymanie dobrej jakości obrazów ze skaningowego mikroskopu elektronowego. Do badań tych zwykle wykorzystuje się sygnał odbitych elektronów.

Z punktu widzenia ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM, sygnał ten jest najbardziej prawidłowy. Powstaje wyraźna różnica w sygnale odbitych elektronów pochodzących od poru i od cząstki. Umożliwia to jednoznacznie odróżnić od siebie obraz tych dwóch składników mikrostruktury. Na obrazie mikroskopu pory będą ciemne, a cząstki jasne.

Ilościowa analiza mikrostrukturalna. Po umieszczeniu próbki w komorze skaningowego mikroskopu elektronowego i otrzymaniu prawidłowego obrazu, rozpoczynamy przegląd jej powierzchni. W zależności od jednorodności mikrostruktury gruntu oraz od indywidualnych potrzeb badawczych, typujemy fragmenty próbki do analizy. Następnie dobieramy powiększenia, przy których analiza obrazu będzie wykonywana. Głównie zależy to od dyspersji gruntu, a wybór powiększeń musi obejmować największe, jak i najmniejsze pory lub cząstki. Z kolei poszczególne obrazy z mikroskopu są zapisywane do pamięci komputera za pośrednictwem programu STIMAN. Również do dokumentacji i przeprowadzenia analizy jakościowej są wykonywane fotografie analizowanej próbki.

Program STIMAN. Program ten jest oryginalnym pomysłem zespołu prof. V.N. Sokolova z MGU. Nasz instytut dzięki funduszom z KBN-u jest w posiadaniu tego programu.

Program STIMAN w wersji 2.07 składa się z trzech bloków: bloku rejestrującego, bloku statystycznego opracowania danych (obliczeniowego) oraz bloku gromadzenia danych (baza danych). Blok rejestrujący wraz z kartą graficzną umożliwia zapisanie obrazów ze skaningowego mikroskopu elektronowego do pamięci komputera. Przykład takiego obrazu zapisanego w programie STIMAN przedstawia ryc. 3. Obraz taki składa się z elementarnych, kwadratowych komórek. Liczbę elementów rozpadu obrazu programuje się w zależności od dokładności, jaka jest wymagana w pracach badawczych. W każdym elemencie rozpadu określane jest, a następnie kodowane cyfrowo natężenie sygnału czyli jego jasność.

Następnie dane z bloku rejestrującego przesyłane są do bloku statystycznego opracowania danych. Tam następuje obliczenie ilościowych parametrów mikrostruktury. Obliczone parametry są przedstawiane w zestawieniu z podaniem ich wartości całkowitych i średnich. Mogą być

także przedstawione ich rozkłady w formie histogramów. W sumie program daje 8 histogramów, np. ryc. 4, 5, diagram rozkładu powierzchni od współczynnika formy porów (ryc. 6) oraz różę orientacji elementów mikrostruktury (ryc. 7).

Z kolei dane z obliczonymi parametrami są przesyłane do bloku gromadzenia danych. W bloku tym wszystkie dane są przechowywane i w każdej chwili mogą być pobrane i wykorzystane powtórnie. W ten sposób program STIMAN automatycznie tworzy bazę danych.

Parametry cech morfometrycznych mikrostruktury. Głównym parametrem cech morfometrycznych mikrostruktury jest wielkość porów lub cząstek, która jest charakteryzowana przez ich średnicę D . Ze względu na anizometryczne kształty tych elementów strukturalnych dla określenia jej przyjęto pojęcie ekwiwalentnej cząstki lub poru (Osipov i in., 1989).

Kolejnymi parametrami wyznaczanymi przy pomocy ilościowej analizy mikrostrukturalnej w

skaningowym mikroskopie elektronowym są powierzchnia S (ryc. 4) i obwód P porów lub cząstek. Znajomość tych dwóch parametrów umożliwia wyznaczenie hydraulicznego promienia porów R . Mając te dane, program STIMAN oblicza tak ważny dla przepuszczalności gruntów współczynnik filtracji k wyznaczany w jednostkach miliardarcy [mδ] (tab. 1).

Przy ocenie kształtu cząstek lub porów wyznaczany jest parametr zwany współczynnikiem formy elementów strukturalnych K_f (ryc. 5, 6) (Osipov i in., 1989). Jego wzór przedstawia się następująco:

$$K_f = 3,545 \frac{\sqrt{S}}{P}$$

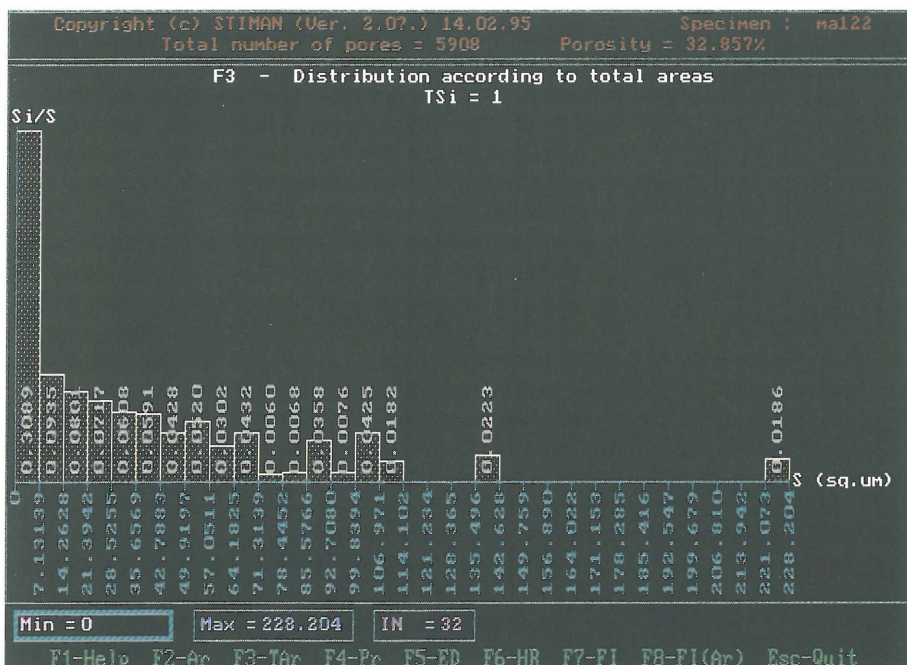
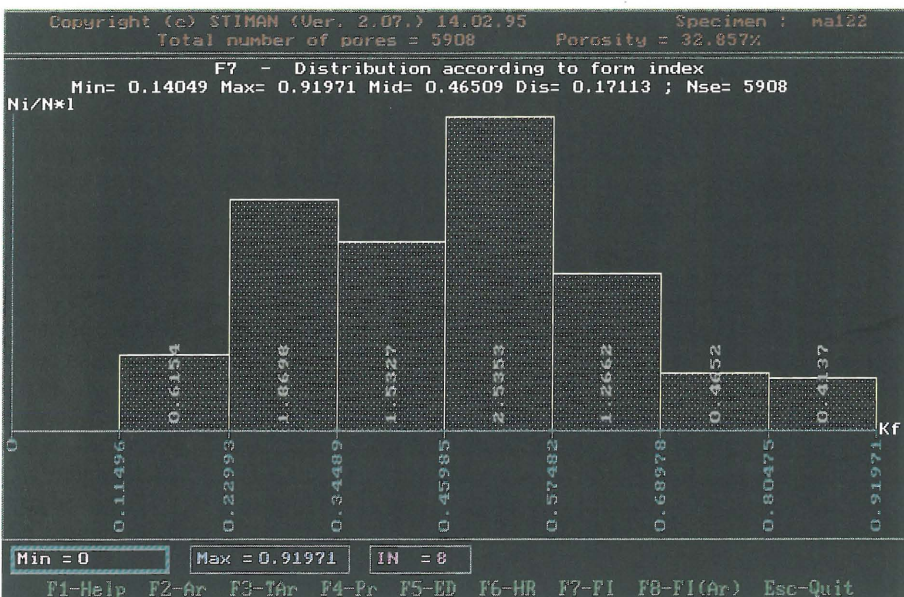
gdzie:

K_f — współczynnik formy poru lub cząstki (–),
 S — pole powierzchni poru lub cząstki (μm^2),
 P — obwód poru lub cząstki (μm).

Im kształt porów lub cząstek jest bardziej wydłużony tym wartość współczynnika formy K_f jest bliższa wartości 0. Bardzo często kształt porów odzwierciedla określony proces zachodzący w gruncie, jak na przykład: konsolidacja, lityfikacja, procesy glacictektoniczne. Dlatego parametr ten jest bardzo pomocny przy rozwiązywaniu wielu problemów w geologii inżynierskiej, gruntoznawstwie, hydrogeologii, petrografii czy tektonice.

Parametry cech geometrycznych mikrostruktury. Najważniejszym parametrem charakterystyki geometrycznej mikrostruktury jest orientacja elementów mikrostruktury czyli porów lub cząstek. Orientacja mikrostruktury badana jest metodą spadku intensywności sygnału (Osipov i in., 1989). Metoda ta polega na pomiarze intensywności sygnału czyli jasności w każdym punkcie obrazu. Wielkość spadku intensywności sygnału analizowana jest w 20 kierunkach o rozpiętości od -90° do $+90^\circ$. Na tej podstawie otrzymuje się różę orientacji (ryc. 7), a długość promieni tej róży odpowiada częstotliwości spadku w danym kierunku.

Z róży orientacji zostaje wyznaczony również bardzo ważny parametr mikrostruktury — stopień anizotropii mikro-

Ryc. 4. Histogram rozkładu powierzchni porów S (program STIMAN) w próbce iłu mioceńskiegoRyc. 5. Histogram rozkładu współczynnika formy porów K_f (program STIMAN) w próbce iłu mioceńskiego

struktury K_a (ryc. 7, tab. 1). Z badań wykonanych na dużej liczbie próbek gruntów (Sokolov, 1990) dla współczynnika anizotropii mikrostruktury wydzielono trzy przedziały wartości (Trzciniński, 1993).

Analiza wyników badań

Ilościowej analizie mikrostrukturalnej w SEM zostały podane różne genetycznie grunty występujące na obszarze Polski. Wybrane grunty tworzyły się w odmiennych środowiskach sedymentacyjnych: od morskiego przez glacialne, jeziorne, eoliczne, rzeczne do peryglacialnego oraz w warunkach sztucznych przy współudziale człowieka. To w głównej mierze miało wpływ na zmienność parametrów mikrostrukturalnych oraz fizycznych. Wyniki analizy zostały przedstawione w tabeli 1 oraz na rycinie 8. W tab. 1 zaprezentowano wyniki 10 typowych gruntów, a do ryc. 8 wybrano 3

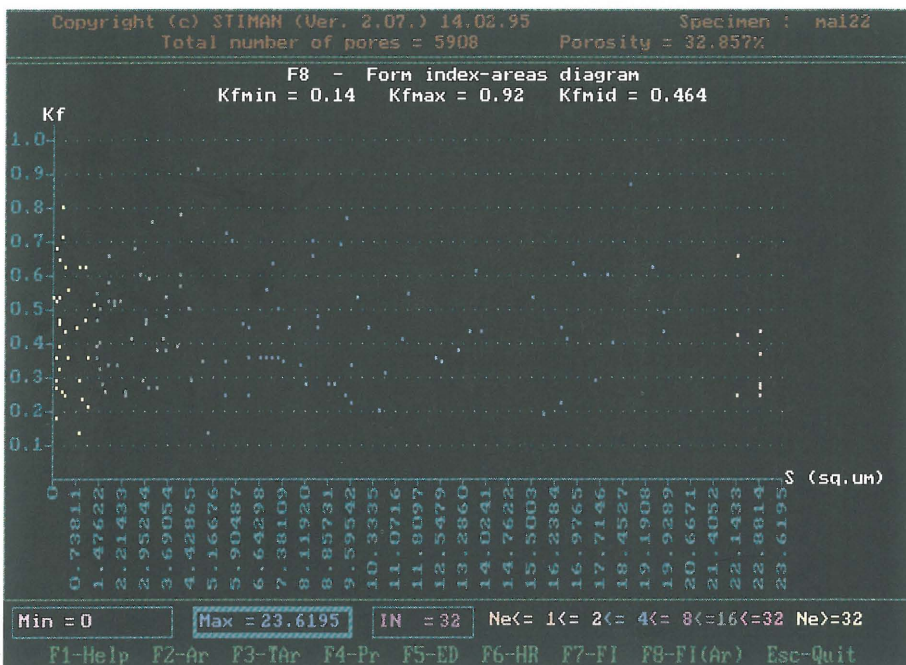
grunty skrajnie różniące się genezą oraz wartościami parametrów. Przedstawione wyniki reprezentują średnie wartości z otrzymywanych dla danego rodzaju gruntu. Szczegółowe dane zamieszczone są we wcześniej cytowanych pracach.

W tab. 1 w górnej części znajduje się 11 parametrów morfometrycznych i geometrycznych przestrzeni porowej mikrostruktury. W części dolnej, dla porównania, dodano kilka podstawowych parametrów fizycznych, takich jak: wilgotność, gęstość objętościowa gruntu, porowatość, skład granulometryczny oraz granica plastyczności i płynności.

Do głównych parametrów morfometrycznych należy średnica porów D_w . Jest to parametr, który zależy od całkowitej powierzchni porów S_i oraz od liczby porów N . Jeśli wartość S_i jest duża, a liczba porów mała to D_w przyjmuje wartości wysokie. Taką zależność możemy zaobserwować dla piasków rzecznych, w których D_w wynosi 30,14 mm. O wiele mniejszą wartość D_w mają lessy — 2,23 mm i popiół — 2,40 mm. Średnia średnica porów dla ilów trzeciorzędowych waha się od ok. 1 do 2 mm. Ekstremalnie małą wartość D_w wykazują gliny zwałowe, ale jest to związane w tym przypadku z małą wartością S_i a dużą liczbą porów N .

Kolejnymi parametrami morfometrycznymi są całkowita powierzchnia porów S_i i całkowity obwód porów P_i . Są one ściśle związane ze składem granulometrycznym gruntów. Przy wyraźnej dominacji jednej lub dwóch frakcji w gruncie, wartości S_i i P_i są wysokie. W gruntach, w których rozkład poszczególnych frakcji jest bardziej równomierny wartości tych parametrów są niższe. Najwyższe wartości S_i i P_i mają: il pliceniński, glina zwałowa, less oraz piasek rzeczny. Ten ostatni ma jednak wyjątkowo małą wartość P_i . W tym przypadku ma to swoje uzasadnienie w liczbie porów N , która jest ekstremalnie mała, gdyż grunt ten ma wyjątkowo duże pory, których jest bardzo mało. W rezultacie daje to niską wartość całkowitego obwodu porów P_i , a bardzo wysoką wartość średniego obwodu porów P_{av} .

Parametrem określającym kształt porów jest współczynnik formy porów K_f . Średnie wartości K_{fav} dochodzące do 0,6 mają less, popiół oraz gliny zwałowe. Również podobną wartość średnią K_{fav} ma zwietrzelina iłu mioceńskiego, która w porównaniu do iłu niezwiertzałego ma pory bardziej owalne. Związane jest to z procesami wietrzenia, które są przyczyną zmian zachodzących w mikrostrukturze. Najniższe wartości K_{fav} dochodzące do ok. 0,4 mają il glacialimiczny i piasek rzeczny. Ten ostatni ma tak niską wartość K_{fav} ze

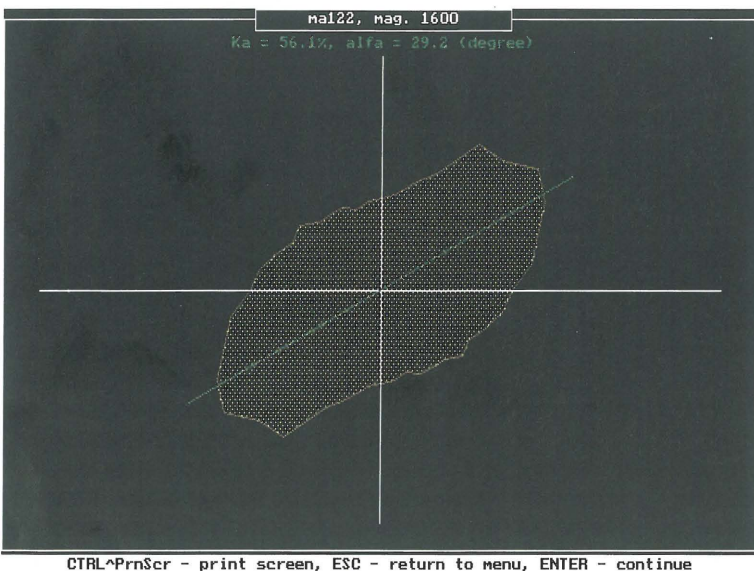


Ryc. 6. Diagram rozkładu powierzchni porów S w zależności od współczynnika formy porów K_f (program STIMAN) w próbce iltu mioceńskiego

względem na specyficzny kształt porów utworzonych pomiędzy owalnymi ziarnami kwarcu. Rozkład współczynnika formy porów K_f dla iltu plioceńskiego, gliny zwałowej oraz lessu można prześledzić na ryc. 8 (C1, C2, C3), a dla iltu mioceńskiego na ryc. 5. Dla każdego z tych gruntów obserwujemy różne histogramy ze zmiennymi maksymalnymi wartościami K_f .

Kolejnymi parametrami morfometrycznymi są całkowita liczba porów N oraz porowatość n . W glinach zwałowych N przyjmuje wartości bardzo zmienne, od małych $8,7 \times 10^3$ do bardzo wysokich $313,4 \times 10^3$. W iltach liczba porów N osiąga wartość średnią ok. 30×10^3 . Przy porównaniu tych samych iltów mioceńskich zwietrzałych i niezwiertzałych znacznie, gdyż dwukrotnie zwiększyła się wartość N dla iltów zwietrzałych. Najniższe wartości N wykazują less, piasek rzeczny oraz popiół.

Wartości porowatości n prezentowanych gruntów mają tendencję wzrastającą od iltów mioceńskich, które są najstar-



Ryc. 7. Róża orientacji porów (program SITMAN) w próbce iltu mioceńskiego

sze do piasków i zwietrzelin, które są najmłodsze (tab. 1). W iltach trzeciorzędowych porowatość n wynosi ok. 33%. W glinach zwałowych (ablacyjnych z wytopienia) wartość jej wynosi od 29% dla najstarszych do 41% dla najmłodszych. Iły glacialimiczne oraz lessy mają ok. 40% porowatości, a piaski rzeczne, zwietrzały ilt mioceński oraz popiół od 47 do 55%.

Charakterystykę geometryczną mikrostruktury uzyskuje się na podstawie kształtu róży orientacji, orientacji alfa oraz stopnia anizotropii mikrostruktury K_a . Przedstawione na ryc. 8 (B1, B2, B3) róże orientacji dla trzech gruntów zasadniczo różnią się kształtem. Kształt elipsy ma różną orientację iltu plioceńskiego (B1), w którym pory są wydłużone i płaskie, bliskie poziomemu ułożeniu. Drugim skrajnym przypadkiem jest róża orientacji lessu (B3), która kształtem zbliżona jest do okręgu. Analizując stopień anizotropii mikrostruktury K_a , najwyższą wartość mają ilt mioceński — 56,1% oraz ilt glacialimiczny — 45,0% (tab. 1). Od 20 do 35% mają ilt plioceński i zwietrzelina iltu mioceńskiego. Wartości te świadczą o mikrostrukturach wysoko zorientowanych. W glinach zwałowych przeważają wartości K_a od 5 do 1%, a więc takie, jak dla mikrostruktur średnio i słabo zorientowanych.

Podsumowanie

W zakończeniu niniejszego artykułu należy podkreślić, że:

— utworzono w IHiGI WG Uniwersytetu Warszawskiego stanowisko badawcze do ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM,

— opracowano i wybudowano prototypowy zestaw do suszenia niskotemperaturowego przez sublimację w próżni dla próbek gruntów, które mają być poddane tym badaniom,

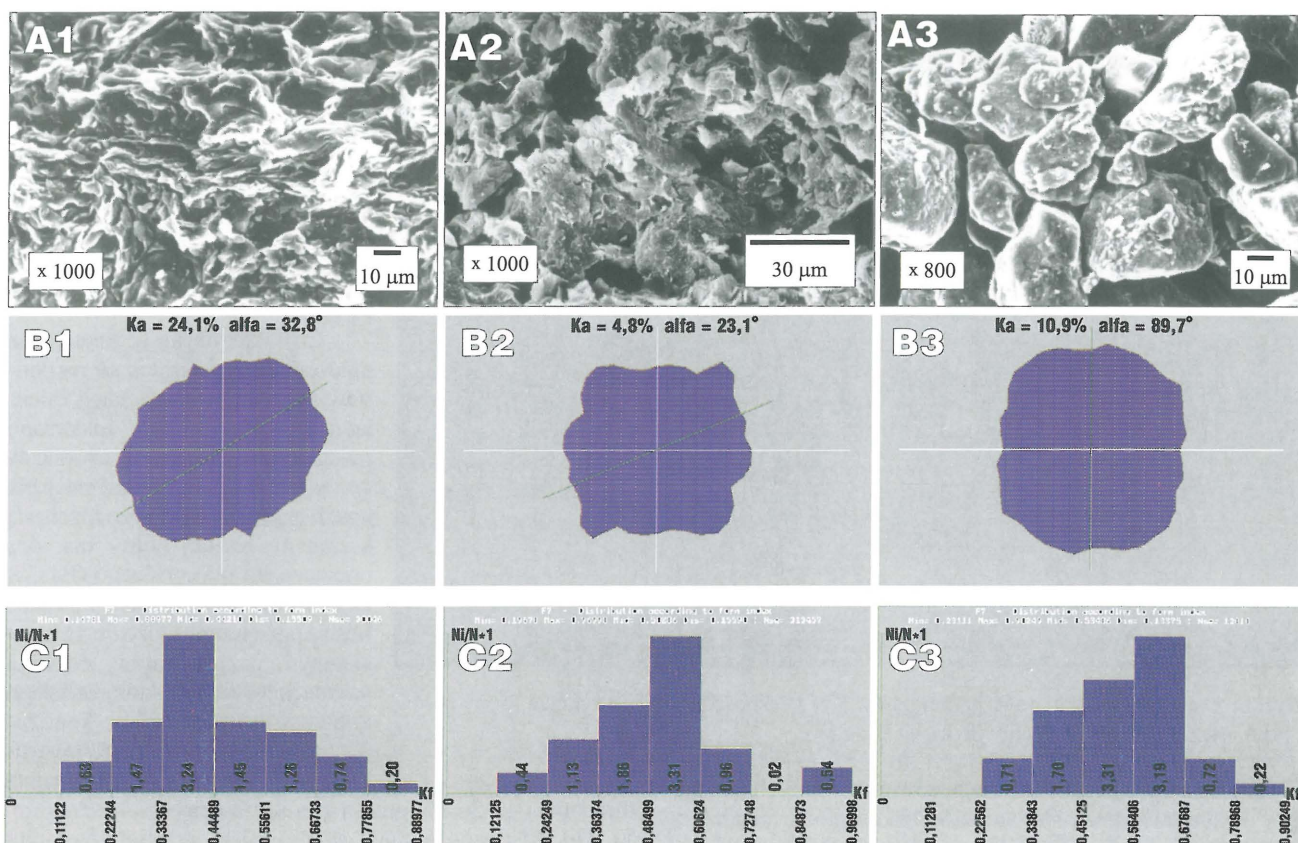
— zaprezentowano, przykładowe wyniki badań typowych gruntów występujących na terenie Polski,

— wyniki wskazują na wyraźne zróżnicowanie ilościowych parametrów przestrzeni porowej spowodowane tworzeniem się tych gruntów w odmiennych środowiskach sedymentacyjnych,

— przeprowadzone dotychczas badania mogą wskazywać na występowanie pewnych zależności pomiędzy właściwościami gruntu, a ilościowymi parametrami mikrostruktury (tab. 1),

— w badaniach mikrostruktur gruntów w Polsce jest to kolejny postęp i krok naprzód oraz nowe i nowoczesne narzędzie w szeroko rozumianych badaniach geologicznych.

Potrzebne są dalsze badania w celu umożliwienia zastosowania metod statystycznych pozwalających określić zależności funkcyjne pomiędzy mikrostrukturą a właściwościami gruntu dla różnych środowisk sedymentacyjnych.



Ryc. 8. Wyniki ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM trzech różnych genetycznie gruntów: iltu plicieńskiego (1), gliny zwalowej (2) oraz lessu (3). A — zdjęcia mikrostruktur, B — róże orientacji porów, C — histogramy rozkładu współczynnika formy porów K_f

Autorzy tą drogą dziękują wszystkim, którzy przyczynili się do utworzenia stanowiska badawczego do ilościowej analizy mikrostrukturalnej w SEM, a w szczególności: Komitetowi Badań Naukowych za zakupienie z funduszy grantu 3P403 008 06 unikalnego programu do analiz ilościowych, Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej za zakupienie z programu SUBIN elementów zestawu do suszenia próbek gruntu.

L i t e r a t u r a

- BAKER J.C., GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. & UWINS P.J.R. 1995 — *Applied Clay Science*, 9: 465–469.
- BAKER J.C., UWINS P.J.R. & MACKINNON I.D.R. 1993 — *J. of Petroleum Sc. and Eng.*, 8: 269–277.
- BARAŃSKI M. & CZAJKA R. 1995 — *Baltic Geotechnics*, 8: 47–50.
- CASAGRANDE A. 1932 — *J. Bost. Soc. Civil Eng.*, 19: 168–209.
- CZAJKA R. 1992 — *Prz. Geol.*, 40: 677–681.
- CZAJKA R. 1994 — Zachowanie się iltów glacialimicznych w warunkach statycznych i dynamicznych obciążeń. Arch. Wydz. Geol., Uniwersytet Warszawski: 84–102.
- FILATOV M.B. 1936 — *Proc. Conf. Sec. Int. Soil Sc. Assoc.*, 5: 642–647.
- GOLDSCHMIDT V.M. 1926 — *Proc. 3th Conf.*, Oslo: 434–445.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1971 — *Prz. Geol.*, 19: 386–389.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1975 — *Bull. IAEG*, 11: 45–48.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1977 — *Bull. Acad. Pol. Sc., Sér. Sc. Terre.*, 26: 485–491.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1982 — *Ibidem*, 30: 162–165.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1983 — *Ibidem*, 31: 9–19.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. 1988 — *Eng. Geol.*, 25: 177–199.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (ed.) 1990 — *Metody badań gruntów spoistych*. Wyd. Geol.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V.I. & SOKOLOV V.N. 1984 — *Atlas of the microstructure of clay soil*. PWN.
- KACZYŃSKI R. 1994 — Projekt KBN 3P403 008 06 pt. Wpływ obciążeń dynamicznych na wytrzymałość wybranych gruntów antropogenicznych. Arch. Zakł. Pr. Geol. UW, Warszawa.
- KACZYŃSKI R., CZAJKA R. & JARZĄBEK-MAKAROWICZ E. 1993 — *Mat. X Konf. Mech. Gruntów i Fund.*, 2: 153–162.
- KACZYŃSKI R. & TRZCIŃSKI J. 1990 — Oznaczanie parametrów wytrzymałościowych glin zlodowacenia północnopolskiego. Arch. Zakł. Pr. Geol. Uniwersytet Warszawski.
- KACZYŃSKI R. & TRZCIŃSKI J. 1992 — *Geol. Quart.*, 36: 481–508.
- LOVE M.A. & DERBYSHIRE E.S. 1985 — *Proc. Conf. on Glacial Till*. Edinburg: 129–133.
- OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N. & RUMYANTSEVA N.A. 1989 — *Mikrostruktura glinistych parod*. Izd. Niedra. Moskwa.
- SERGEEV Y.M., SPIVAK G.V., SASOV A.Y., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N. & RAU E.I. 1983 — *J. Microsc.*, 135: 1–12.
- SERGEEV Y.M., SPIVAK G.V., SASOV A.Y., OSIPOV V.I., SOKOLOV V.N. & RAU E.I. 1984 — *Ibidem*, 135: 13–24.
- SMART P. 1973 — *Proc. Intern. Symp. Soil Struc.*, Swedish Geotechnical Institute, Stockholm: 69–76.
- SMART P. & TOVEY K. 1981 — *Electronmicroscopy of soil and sediments: examples*. Clarendon Press. Oxford.
- SMART P. & TOVEY K. 1982 — *Electronmicroscopy of soil and sediments: techniques*. *Ibidem*.
- SOKOLOV V.N., OSIPOV V.I. & TOLKACHEV M.D. 1980 — *J. Microsc.*, 120: 363–366.
- SOKOLOV V.N. 1990 — *Proc. 6th Inter. IAEG Congres*, 1: 753–760.
- TERZAGHI K. 1925 — *Erdbaumechnik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Wien.
- TRZCIŃSKI J. 1993 — *Geol. Quart.*, 37: 109–120.
- TRZCIŃSKI J. 1995 — *Ibidem*, 39: 403–422.
- TRZCIŃSKI J. 1997 — *Proc. IAEG Symp. Athens* (w druku).