

Tadeusz KAPUŚCIŃSKI, Ewa STRZAŁKOWSKA
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE MIKROSONDY ELEKTRONOWEJ DO BADAŃ ODPADÓW PALENISKOWYCH

Streszczenie. W ramach pracy przedstawiono rezultaty badań popiołów lotnych i żużli pochodzących z elektrowni „Łaziska” przy wykorzystaniu mikrosondy elektronowej. Zbadano sposób występowania i wzajemne relacje krystalochemiczne wybranych pierwiastków toksycznych z występującymi w odpadach fazami, w celu określenia stopnia ich rozpuszczalności. Punktowe analizy chemiczne wskazują na brak powinowactwa krystalochemicznego pierwiastków toksycznych z wydzielonymi fazami, nie mniej w kilku punktach występowania kwarcu lub krystalalitu stwierdzono podwyższone ilości rtęci, a w fazie glinokrzemianowej arsenu.

THE USE OF AN ELECTRON MICROPROBE FOR TESTING COMBUSTION WASTE

Summary. The scope of the paper is the presentation of the results of the tests on volatile ashes and slag from “Łaziska” Power Plant conducted by means of an electron microprobe. The deposition and mutual crystal chemistry relations of selected toxic elements were investigated in view of the compounds of waste, to designate the degree of their solubility. Point chemical analyses indicate the absence of crystal chemistry affinity between the toxic elements and the separated compounds; however, in a few points of the occurrence of quartz and cristobalite, increased quantities of mercury were detected, and, in the case of the aluminosilicate compound, of arsenic.

1. Wprowadzenie

Metoda spektralnej mikroanalizy rentgenowskiej stanowi ważne uzupełnienie badań chemicznych i fazowych zarówno minerałów, jak i skał. Jej zaletą jest możliwość analizy drobnych fragmentów mineralnych (od 1 μm do kilkuset μm), których wydzielenie do badań jest praktycznie niemożliwe [1]. Zarejestrowane pomiary długości i natężenia fal, powstałych

na skutek wzbudzenia elektrycznego atomów, umożliwiając oznaczenie jakościowego, a także ilościowego składu chemicznego. Uwzględniając prowadzone jednocześnie badania fazowe, można uzyskać dzięki tej metodzie cenne informacje o wzajemnych relacjach krystalochemicznych współwystępujących ze sobą pierwiastków.

Przesłanki te skłoniły autorów artykułu do wykorzystania spektralnej mikroanalizy rentgenowskiej do badań odpadów paleniskowych. Badania w mikroobszarach miały na celu ustalenie, poprzez punktowe analizy, składu chemicznego oznaczonych rentgenograficznie i mikroskopowo faz badanych odpadów oraz uściślenie sposobu współwystępowania i stopnia termicznego przeobrażenia. Dodatkowo uzyskano informacje dotyczące morfologii i rozmiarów cząstek oraz rozmieszczenia pierwiastków toksycznych w oznaczonych fazach popiołów i żużli. Ze względu na ocenę potencjalnego zagrożenia dla środowiska ważna jest bowiem nie tylko całkowita zawartość metali ciężkich w odpadach, lecz także znajomość form ich występowania [2, 3, 5].

2. Materiał i metodyka badań

Materiał do badań stanowiły próbki popiołów i żużli z Elektrowni Łaziska. Próbki żużli pobrano z leja żużlowego, natomiast próbki popiołów zostały odseparowane w filtrach workowych przy półsuchej metodzie odsiarczania i w elektrofiltrach przy technologii odsiarczania na mokro. Pobrane próbki przygotowano do badań zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-90/G04502. Analizy wykonano przy zastosowaniu mikroanalizatora rentgenowskiego typu JCXA 733 firmy Jeol, współpracującego ze spektrometrem energodispersyjnym Link ISIS 300 firmy Oxford Instruments, pozwalającego na wykonanie ilościowych analiz chemicznych w mikroobszarach badanych próbek.

3. Wyniki badań

Penetracją objęto 12 mikroobszarów, ogółem zarejestrowano 80 punktowych analiz chemicznych, ze względu jednak na zbyt obszerny materiał, w artykule zamieszczono tylko przykładowe analizy.

Tabela 1

Skład chemiczny w wybranych mikroobszarach występowania fazy glinokrzemianowej (popiół lotny)

Składniki chemiczne	Popiół lotny z produktami odsiarczenia										Popiół lotny bez produktów odsiarczenia			
	Pkt 1 (x/y) (1/1)	Pkt 2 (1/2)	Pkt 3 (1/3)	Pkt 4 (1/4)	Pkt 5 (1/6)	Pkt 10 (2/4)	Pkt 11 (2/5)	Pkt 12 (2/7)	Pkt 13 2/8	Pkt 10 (2/9)	Pkt 11 (3/2)	Pkt 12 (3/3)	Pkt.13 (3/4)	
SiO ₂	49,39	50,24	48,45	49,28	53,76	71,73	54,34	54,50	54,69	56,77	37,44	23,76	59,06	
Al ₂ O ₃	36,06	36,68	29,96	30,13	30,00	19,07	36,95	34,11	35,76	30,30	22,41	34,80	30,59	
TiO ₂	0,85	0,53	1,16	1,14	0,77	0,40	0,00	1,23	1,16	2,19	0,55	0,71	0,88	
Fe ₂ O ₃	4,76	4,43	3,39	3,04	4,45	1,45	2,74	2,31	1,95	3,40	5,62	7,77	3,51	
MnO	0,00	0,01	0,26	0,12	0,23	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	1,06	0,98	0,03	
MgO	1,93	1,18	3,39	2,55	1,20	0,00	0,00	1,53	1,02	1,09	10,81	18,13	1,12	
CaO	0,37	0,31	7,84	7,97	1,03	0,89	0,74	0,64	0,40	0,71	21,42	13,39	0,34	
Na ₂ O	0,71	0,48	0,30	0,17	2,15	0,50	0,00	1,27	0,83	0,48	0,00	0,00	0,00	
K ₂ O	5,49	5,42	2,35	2,74	4,10	4,05	2,75	3,08	3,17	4,30	0,16	0,05	3,40	
P ₂ O ₅	0,00	0,05	1,58	1,71	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SO ₃	0,05	0,00	0,08	0,16	0,47	0,42	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
As	0,18	0,42	0,84	0,72	1,25	1,05	1,69	0,89	0,87	0,30	0,21	0,35	0,87	
Cd	0,07	0,00	0,00	0,15	0,28	0,00	0,00	0,20	0,00	0,25	0,10	0,00	0,00	
Cl	0,00	0,05	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cr	0,04	0,00	0,17	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	
Cu	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,06	0,21	0,19	0,00	0,07	
Hg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Pb	0,00	0,20	0,04	0,12	0,00	0,04	0,21	0,13	0,05	0,00	0,00	0,00	0,13	
Zn	0,10	0,00	0,17	0,00	0,25	0,00	0,10	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	
Suma	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Uwaga: (x/y) x – mikroobszar, y – numer punktu na fot.

Porządkując wyniki badań, należy na wstępie zwrócić uwagę na duży rozrzut wielkości ziaren popiołu (od 1 do 50 μm) szczególnie w odniesieniu do kuleczkowatych form stopionej substancji mineralnej (fot. 3).

Największy udział analiz punktowych dotyczy przeobrażonej termicznie substancji ilastej zidentyfikowanej rentgenograficznie jako faza amorficzna z mullitem, w literaturze określana jako matryca glinokrzemianowa lub szkliwo/mullit [4]. Faza ta wykazuje zróżnicowane kształty, najczęściej kuliste-masywne (fot. 1, pkt 1, 2, 3, 4, 6, 8, fot. 2, pkt 1, 4), kuliste - wewnątrz puste (fot. 3, pkt 2, 5), rzadziej nieregularne – porowate (fot. 5, pkt 1, 2, 3, 4). Skład chemiczny fazy glinokrzemianowej w popiele lotnym oraz żużlu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 2

Skład chemiczny w wybranych mikroobszarach występowania fazy glinokrzemianowej (żużel paleniskowy)

Składniki chemiczne [% wagowy]	Pkt 1 (1/1)	Pkt 2 (1/2)	Pkt 3 (1/3)
SiO ₂	41,79	40,04	48,43
Al ₂ O ₃	26,53	26,14	37,14
TiO ₂	1,13	1,13	1,02
Fe ₂ O ₃ +FeO	8,89	9,53	3,26
MnO	0,29	0,06	0,01
MgO	3,17	3,68	3,16
CaO	10,53	10,33	2,30
Na ₂ O	0,58	0,24	0,57
K ₂ O	1,38	1,34	2,60
P ₂ O ₅	4,97	6,70	0,62
SO ₃	0,12	0,25	0,12
As	0,43	0,14	0,42
Cd	0,00	0,08	0,00
Cl	0,00	0,02	0,00
Cr	0,08	0,00	0,06
Cu	0,00	0,16	0,04
Hg	0,00	0,16	0,20
Pb	0,00	0,00	0,00
Zn	0,11	0,00	0,05
Suma	100,00	100,00	100,00

cd. tabeli 3

SO ₃	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16
As	0,18	0,01	0,14	0,00	0,00	0,00	0,06
Cd	0,00	0,03	0,00	0,24	0,00	0,04	0,00
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
Cr	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,06	0,02
Cu	0,00	0,00	0,05	0,12	0,00	0,00	0,00
Hg	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,64	0,52
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	0,12	0,00	0,09	0,18	0,00	0,00	0,08
Suma	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 4

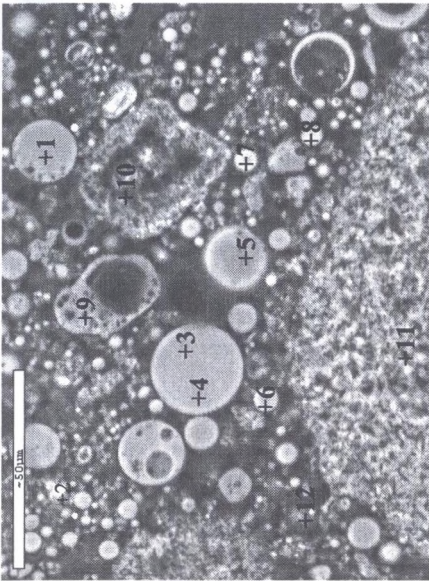
Skład chemiczny fazy krzemionkowej SiO₂ (kwarcu wtórnego) [%masowy]

Składniki chemiczne [% wagowy]	Popiół lotny z produktami odsiarczania		Żużel paleniskowy	
	<u>Pkt 1</u>	<u>Pkt 2</u>	<u>Pkt 3</u>	<u>Pkt 4</u>
	(2/2)	(2/6)	(1/5)	(2/1)
SiO ₂	84,13	80,32	80,91	86,85
Al ₂ O ₃	10,54	12,52	10,77	7,76
TiO ₂	0,51	0,67	0,47	0,48
Fe ₂ O ₃ + FeO	0,70	2,06	2,62	0,86
MnO	0,00	0,00	0,01	0,08
MgO	0,00	0,54	0,97	0,59
CaO	0,74	0,18	0,73	0,17
Na ₂ O	0,20	0,00	0,18	0,44
K ₂ O	2,47	2,96	2,56	1,88
P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,10	0,00
SO ₃	0,30	0,00	0,07	0,12
As	0,36	0,44	0,00	0,26
Cd	0,00	0,00	0,13	0,09
Cl	0,00	0,00	0,02	0,02
Cr	0,00	0,07	0,06	0,10
Cu	0,00	0,03	0,09	0,00
Hg	0,00	0,00	0,26	0,30
Pb	0,00	0,21	0,00	0,00
Zn	0,05	0,00	0,05	0,00
Suma	100,00	100,00	100,00	100,00

Jak wynika z punktowych analiz faz krzemionkowych, ziarna detrytycznego kwarcu cechują się wysoką czystością o zawartości SiO_2 średnio 98,18%. Natomiast faza krzemionkowa wtórna utworzona w wyniku procesu mullityzacji związana jest zawsze z obecnością substancji glinokrzemianowej. W popiołach ziarna kwarcu są przeważnie kuliste (fot. 1, pkt 5 i fot. 2, pkt 9), natomiast w żużlach wykazują kształty nieregularne, najczęściej porowate (fot. 6, pkt. 1, 2, 3). Ta różnorodność obserwowanych form morfologicznych jest ściśle związana z przebiegiem procesu spalania węgla w kotle. Zachodzącym reakcjom w stanie stałym towarzyszy, w zakresie temperatur panujących w piecu, nadtopienie bądź stopienie części ziaren przetworzonej termicznie substancji mineralnej. Przeważająca część pyłu węglowego przechodzi przez jądro komory paleniskowej i osiąga panującą w nim maksymalną temperaturę. Pewna część pyłu omija jednak jądro komory, nie osiągając tym samym temperatury topienia i ulega jedynie częściowemu spalaniu. Prowadzi to do powstania zróżnicowanych form morfologicznych, obejmujących składniki przetworzone w stanie stałym i zestalone krople stopu. Pierwsze zazwyczaj wykazują formy nieprawidłowe, drugie najczęściej kuliste.

Trzeci rodzaj faz reprezentują fazy żelaziste spinelowe, których analizy chemiczne zamieszczono w tabeli 5. Zawartość Fe_2O_3 waha się w poszczególnych punktach w granicach od 21,91% do 89,03%. Charakterystyczna jest obecność substancji glinokrzemianowej wyrażona w składzie chemicznym obecnością SiO_2 i Al_2O_3 , których zawartość zależy od ilości fazy żelazistej. Nie można wykluczyć, że faza krzemionkowa w warunkach stopienia cementuje ziarna spinelowe, które ze względu na obecność glinokrzemianów, przyjmują dodatkowo kształty kuliste (fot. 4). Stwierdzono również niewielką ilość punktów zawierających obok Fe także Mg, co można wiązać ze spinelem typu $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Ważnym składnikiem występującym w niektórych punktach jest Mg z podwyższoną zawartością Ca (tabela 5, pkt. 5 i 13), co odpowiada opisanemu w literaturze ferrytowi wapniowemu [4]. Nie stwierdzono w badaniach punktowych oddzielnych skupień faz żelazistych.

Na uwagę zasługują także miejsca występowania niespalonej substancji węglowej. Rzadziej niespalone fragmenty węgla obserwowano w popiele (fot.1, pkt. 10, 11, 12) częściej w żużlu (fot.8, pkt 1, fot.10, pkt 2, 5, 9, 10, 11, 12). Większy udział niespalonej substancji węglowej w żużlach, w porównaniu z popiołami, można tłumaczyć tym, że większe formy morfologiczne materii organicznej (których stwierdzono więcej) opadają do żużla, natomiast lekkie i małe są unoszone ze spalinami.



Fot. 1.

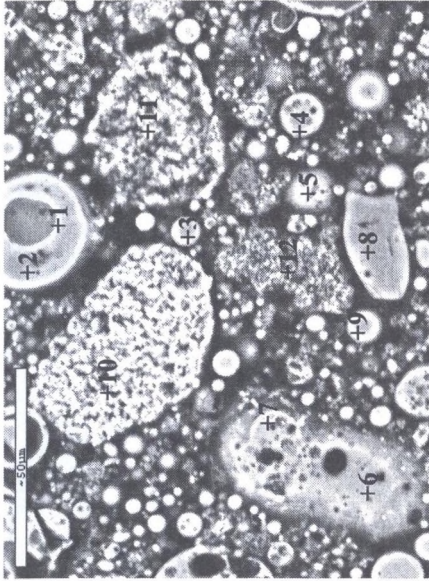
Obraz elektronowy 1 mikroobszaru próbki popiołu lotnego z produktami odsiarczania, pow. 800x.

Na pierwszym planie kulczkowate ziarna fazy glinokrzemianowej (pkt. 1, 2, 3, 4, 6, 8), niekiedy porowate (pkt 9), często zawierające we wnętrzu niespaloną substancję węglową (pkt, 10, 11, 12). Pkt 5 to obtopione ziarno kwarcu, obok faza spinelowa (pkt 7)

Photo 1.

Electron image 1 of the micro-zone of a volatile ash sample with the desulphurization products, 800x.

In the foreground- ball-like grains of the aluminosilicate compound are noticeable (Points 1, 2, 3, 4, 6, 8), sometimes porous (Point 9), often containing unburned coal substance (Points 10, 11, 12). Point 5 is a melted quartz grain, next (Point 7) a spinel compound is discernible

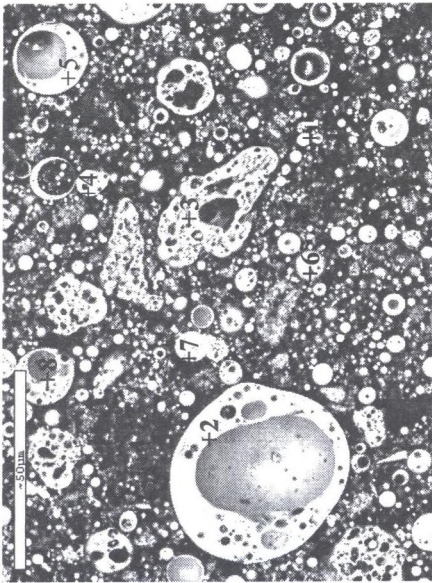


Obraz elektronowy 2 mikroobszaru próbki popiołu lotnego z produktami odsiarczania, pow. 800x.

Na pierwszym planie nieregularne, elipsoidalne konglomeraty siarczanów wapnia z domieszką substancji węglowej (pkt. 10, 11, 12). Drugą fazę stanowią kuliste, różnej wielkości skupienia termicznie przeobrażonej substancji ilastej (pkt. 1, 4, 5, 7, 8). Pkt 9 to obtopione ziarno czystego kwarcu

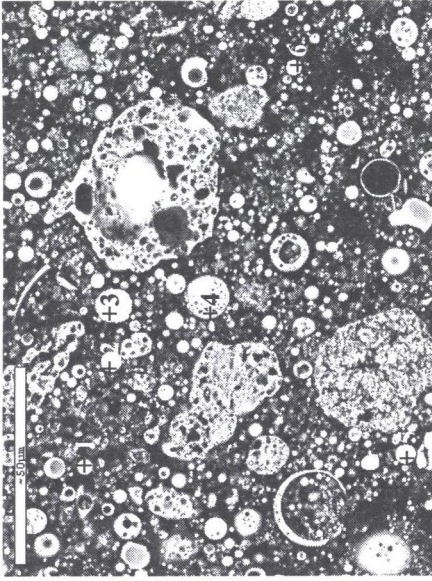
Electron image 2 of the micro-zone of a volatile ash sample with the desulphurization products, 800x.

In the foreground- irregular, ellipsoid conglomerates of calcium sulphates with an addition of coal substance (Points 10, 11, 12). The second compound are globular clusters of transformed argillaceous substance of various sizes (points 1, 4, 5, 7, 8), globular grains of the aluminosilicate compound are noticeable (Points 1, 2, 3, 4, 6, 8). Point 9 is a melted pure quartz grain



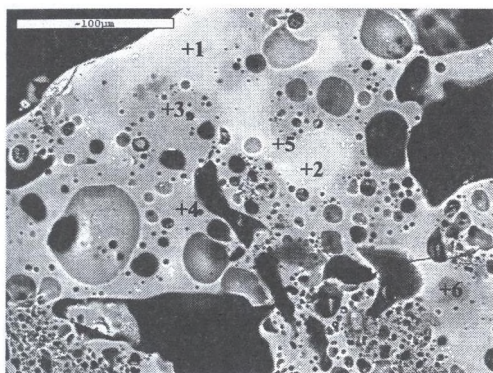
Fot. 3. Obraz elektroniczny 3 mikroobszaru próbki popiołu lotnego z produktami odsiarczania, pow. 800x. Fragment obejmuje różnej wielkości kuliste i nieregularne ziarna fazy glinokrzemianowej (pkt. 2-8). Pkt 1 to skupienie minerałów wapnia i magnezu o składzie mieszanym

Photo 3. Electron image 3 of the micro-zone of a volatile ash sample with the desulphurization products, 800x. The fragment depicts globular and irregular grains of the aluminosilicate compound, of different sizes (Points 2-8). Point 1 is a concentration of calcium and magnesium minerals of mixed composition



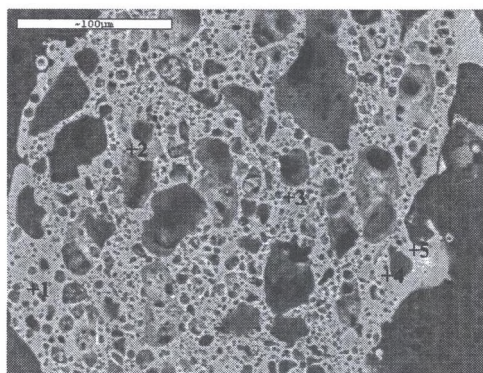
Obraz elektroniczny 4 mikroobszaru próbki popiołu lotnego z produktami odsiarczania, pow. 800x. Na pierwszym planie fazy spinelowe (pkt. 2, 3, 4, 5, 6), w pkt. 1 z otoczką glinokrzemianową

Electron image 4 of the micro-zone of a volatile ash sample with the desulphurization products, 800x. In the foreground - spinel compounds (Points 2, 3, 4, 5, 6) with an aluminosilicate aureole in Point 1



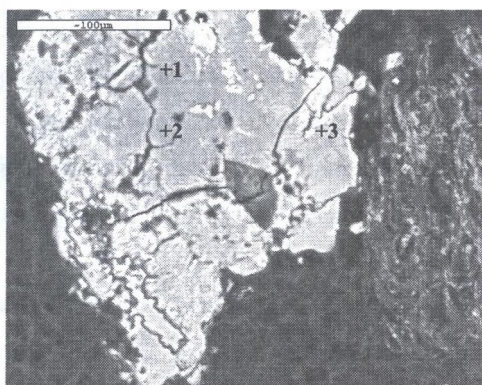
Fot. 5. Obraz elektronowy 1 mikroobszaru próbki żużła paleniskowego, pow. 400x. Fragment porowatej matrycy glinokrzemianowej (pkt. 1, 2, 3, 4). Mikroobszar w obrębie pkt. 5 i 6 odpowiada fazie kwarcu

Photo 5. Electron image 1 of the micro-zone of a furnace slag sample, 400x. A fragment of porous aluminosilicate matrix (Points 1, 2, 3, 4). The micro-zone within Points 5 and 6 corresponds to the quartz compound



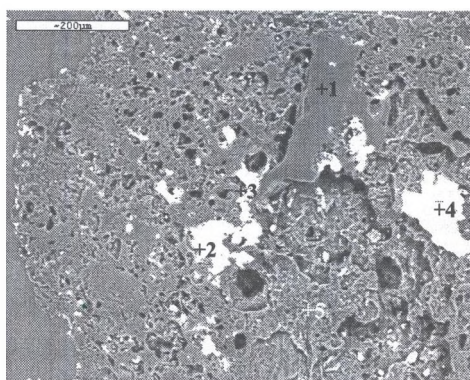
Fot. 6. Obraz elektronowy 2 mikroobszaru próbki żużła paleniskowe, pow. 400x. Fragment porowatego kwarcu (pkt. 1, 2, 3) z przerostami fazy glinokrzemianowej (pkt 4)

Photo 6. Electron image 2 of the micro-zone of a furnace slag sample, 400x. A fragment of porous quartz (points 1, 2, 3) with aluminosilicate compound interlayers (point 4)



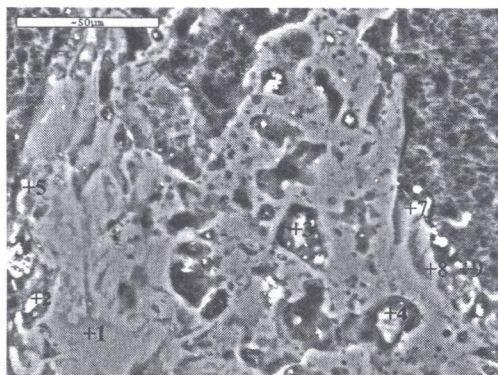
Fot. 7. Obraz elektronowy 3 mikroobszaru próbki żużła paleniskowego, pow. 400x. Fragment fazy spinelowej, magnezowo-żelazowej

Photo 7. Electron image 3 of the micro-zone of a furnace slag sample, 400x. a fragment of spinel compound, magnesium-iron compound



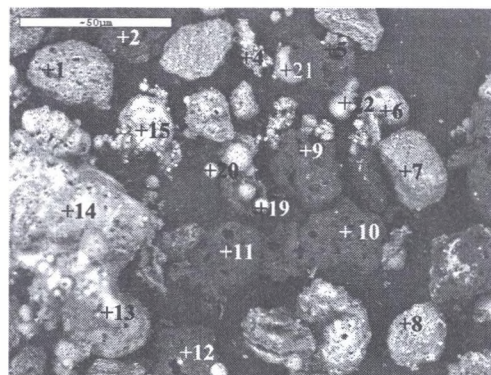
Fot. 8. Obraz elektronowy 4 mikroobszaru próbki żużła paleniskowego, pow. 400x. Na pierwszym planie fragment niespalonej substancji węglowej (pkt 1) z przerostami tlenków wapnia (pkt. 2, 3, 4)

Photo 8. Electron image 4 of the micro-zone of a furnace slag sample, 400x. in the foreground- a fragment of unburned coal substance (point 1) with calcium oxide interlayers (points 2, 3, 4)



Fot. 9. Obraz elektronowy 5 mikroobszaru próbki żużla paleniskowego, pow. 720x. Fragment niespalonej substancji węglowej z wtrąceniami korundu (pkt. 3, 4) i związkami siarki (pkt 1)

Photo 9. Electron image 5 of the micro-zone of a furnace slag sample, 720x. a fragment of unburned coal substance (point 1) with corundum inclusions (points 3, 4) and sulphur compounds (point 1)



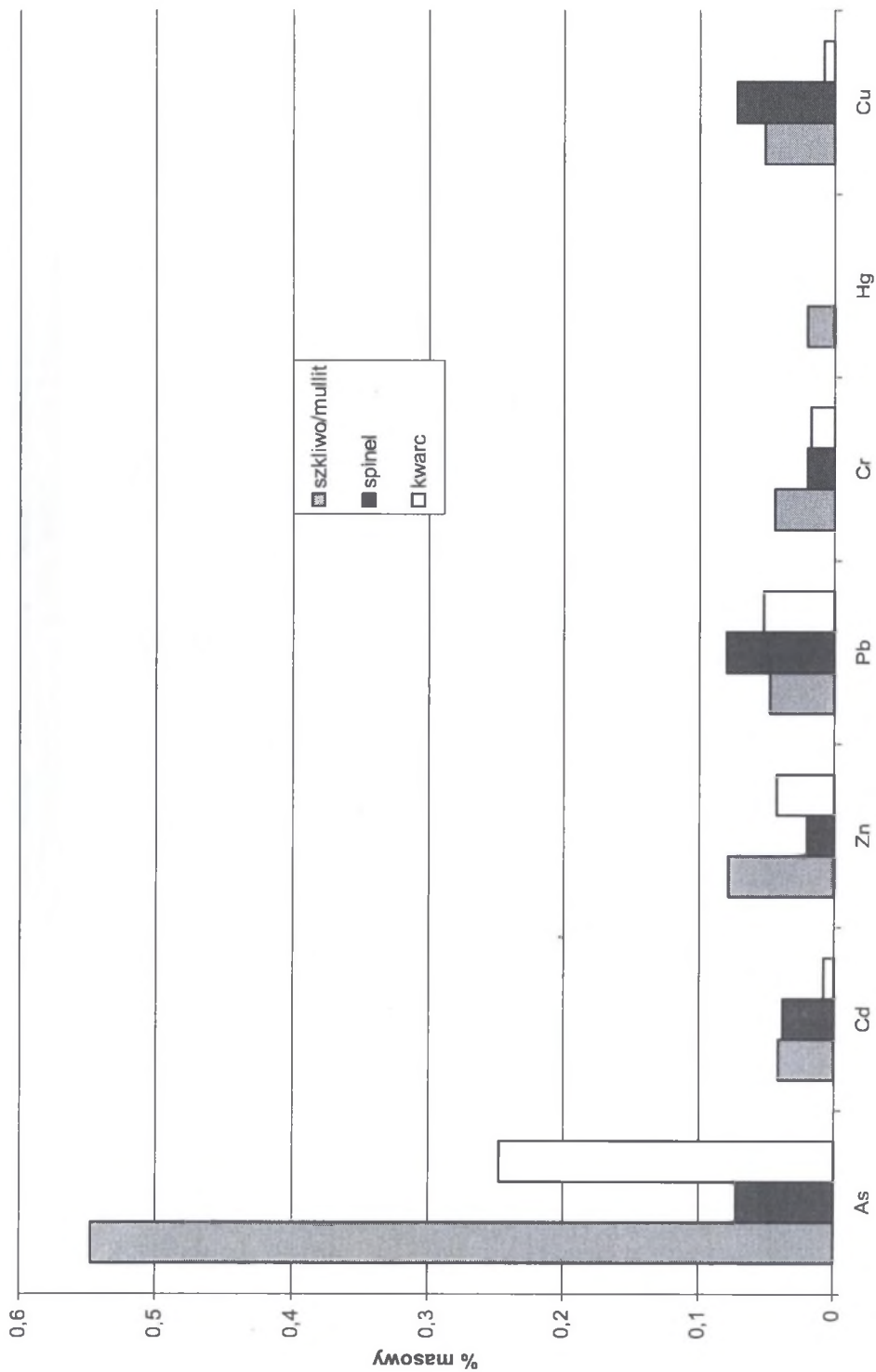
Fot. 10. Obraz elektronowy 6 mikroobszaru próbki żużla paleniskowego, pow. 100x. Pola ciemne charakteryzują się podwyższoną zawartością węgla. Pola jasne to głównie faza glinokrzemianowa z domieszką żelaza

Photo 10. Electron image 6 of the micro-zone of a furnace slag sample, 100x. The dark poles are characterized by increased coal content. The bright poles are mainly aluminosilicate compounds with an addition of iron

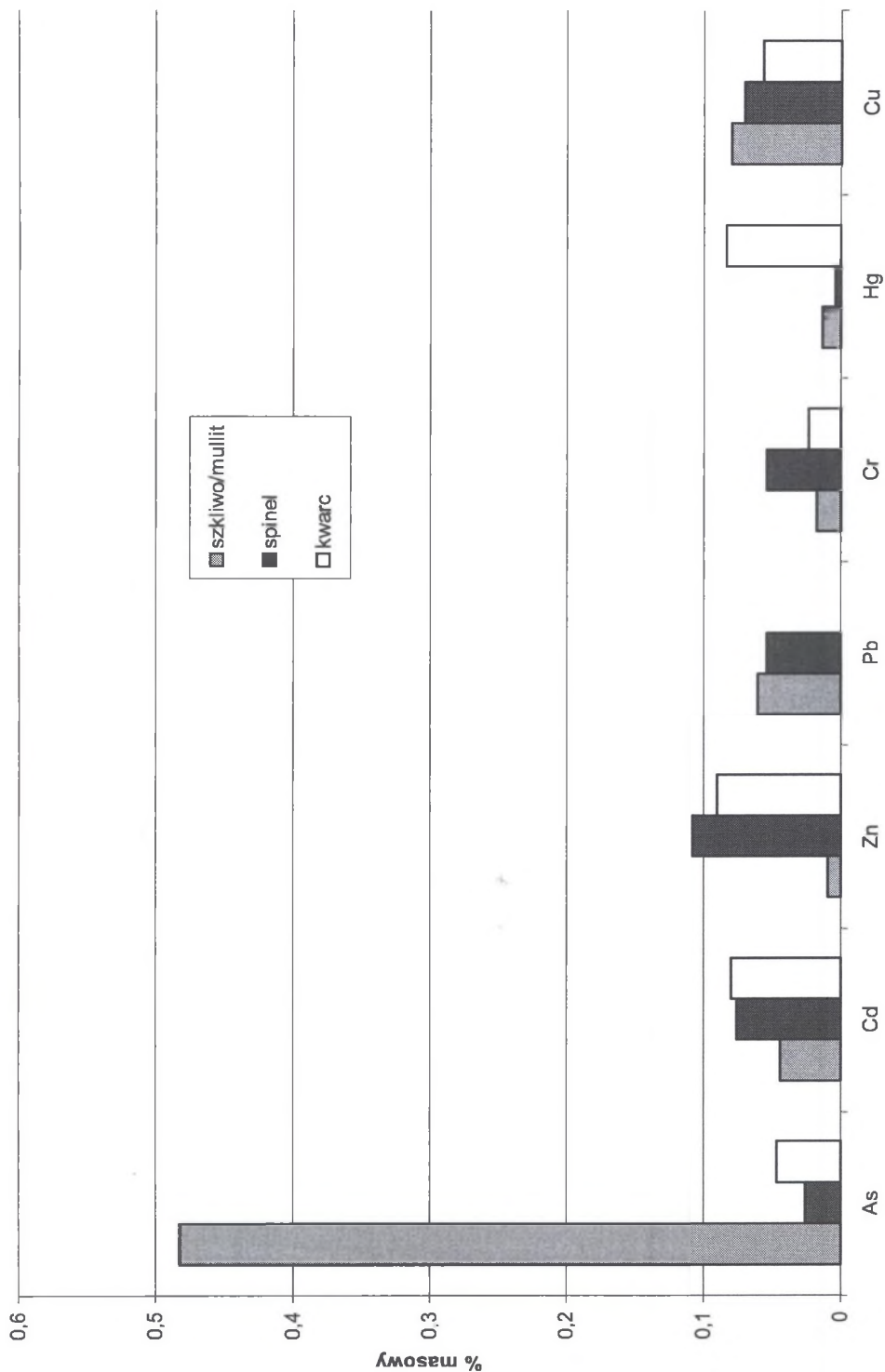
Skład chemiczny substancji nieorganicznej wykazywał znaczne wahania, ujawniające się w niektórych punktach podwyższoną ilością (57,88%) korundu - Al_2O_3 (fot.9, pkt. 3, 4). Świadczy to o niepełnym przereagowaniu termicznym żużla. Faza ta cechuje się wysoką trwałością i odpornością termiczną, jednak - jak wynika z analizy układu fazowego $Al_2O_3 - SiO_2$ - przy jej nieprzereagowaniu powstaje duża ilość niskotopliwej substancji amorficznej obniżającej własności wysokotemperaturowe i zwiększającej skłonności do tworzenia struktur amorficznych - szklistych.

Punktowe analizy chemiczne nie wykazały w większości przypadków powinowactwa krystalochemicznego wybranych pierwiastków toksycznych, tj.: Zn, Pb, Cd, Cr i Cu z wydzielonymi fazami odpadów.

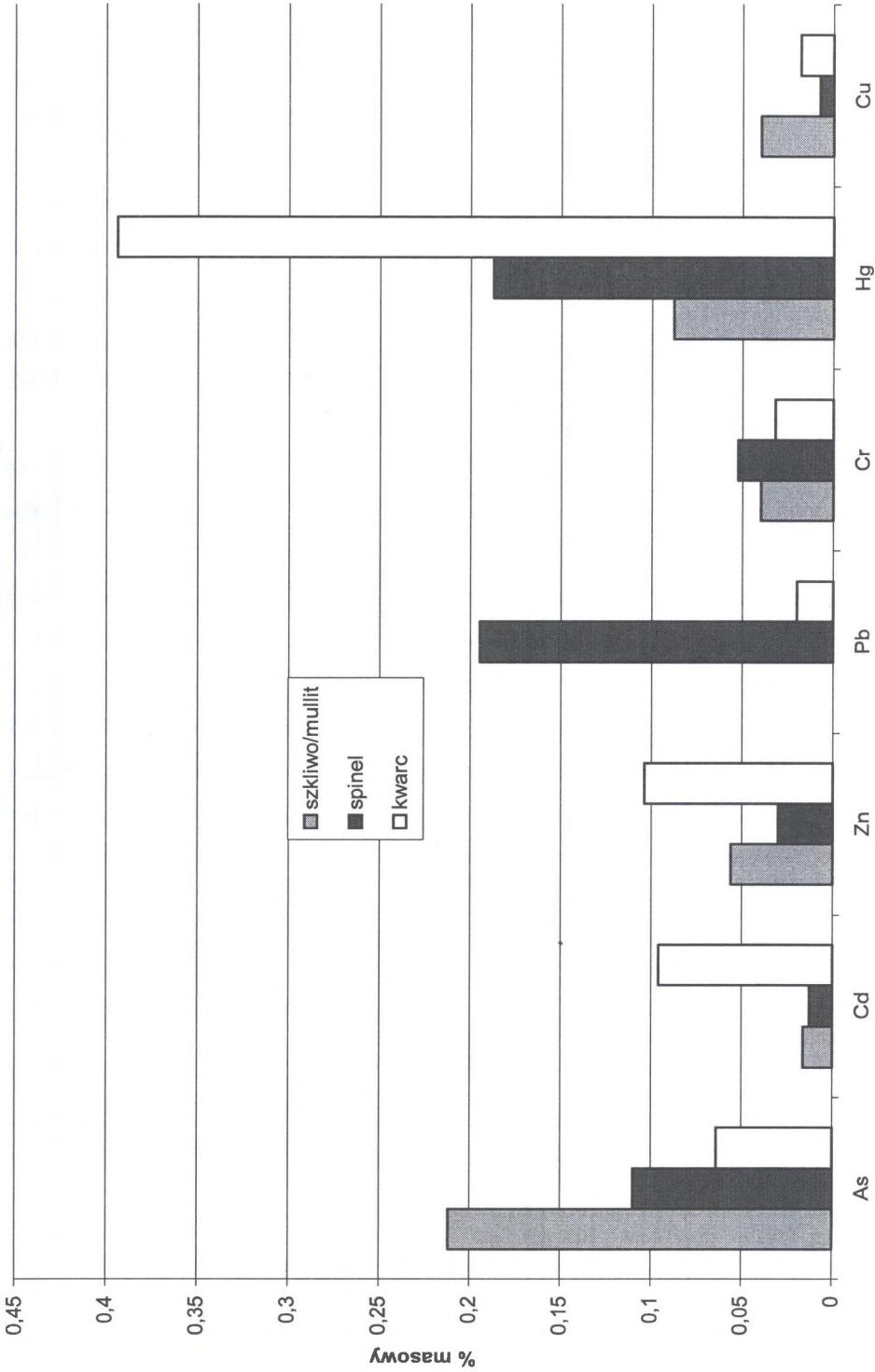
Analizując prawidłowość rozkładu wybranych pierwiastków śladowych w głównych składnikach odpadów (rys.1, 2, 3), zauważa się, iż As koncentruje się głównie w fazie glinokrzemianowej. Prawdopodobnie pierwiastek ten, ze względu na zbliżoną wielkość promienia jonowego do Al ($r_{Al^{3+}} = 0,57nm$, $r_{As^{3+}} = 0,69 nm$), stanowi domieszkę diadochową w mullicie. Interesujące wydają się być znaczne punktowe koncentracje Hg w mikroobszarach występowania kwarcu. Możliwe, że rtęć zachowała się w formie inkluzji jako gaz zamknięty w mikroporach kwarcu, w trakcie szybko przebiegającego procesu spalania i ochładzania. Ze względu na niski udział ilościowy tej fazy (ok. 6%) nie będzie to stwarzało większego zagrożenia dla środowiska.



Rys. 1. Rozkład zawartości pierwiastków śladowych w głównych fazach popiołu z produktami odsiarczania
 Fig. 1. Decomposition of trace elements content in the main compounds of ash with the desulphurization products



Rys. 2. Rozkład zawartości pierwiastków śladowych w głównych fazach popiołu bez produktów odsiarczania
 Fig. 2. Decomposition of trace elements content in the main compounds of ash without the desulphurization products



Rys. 3. Rozkład zawartości pierwiastków śladowych w głównych fazach żużla paleniskowego
Fig. 3. Decomposition of trace elements content in the main compounds of furnace slag

3. Wnioski

Przedstawione w niniejszym artykule badania odpadów paleniskowych przy wykorzystaniu mikros sondy elektronicznej pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Morfologia obserwowanych cząstek odpadów jest bardzo różna: od form idealnie kulistych – masywnych po nieregularne – porowate. Wielkość form kulistych waha się w zakresie 1-50 μm , formy nieregularne są najczęściej większych rozmiarów $>100 \mu\text{m}$.
- Główną fazą odpadów bez względu na ich rodzaj i pochodzenie jest faza glinokrzemianowa. Faza ta rzadko występuje w czystej postaci; punktowe analizy chemiczne wykazują niejednokrotnie podwyższony udział K_2O i CaO .
- Podrzednym składnikiem stwierdzonym w odpadach jest faza krzemionkowa o zawartości SiO_2 średnio 98,18% i żelazista spinelowa, w której udział Fe_2O_3 dochodzi miejscami do 90%.
- Znaczącym składnikiem badanych odpadów, szczególnie żużli, jest niespalona substancja organiczna. Oznaczony ilościowo i jakościowo popiół współwystępujący z substancją organiczną nie odbiega od składu matrycy glinokrzemianowej.
- Dokonany rozdział ilościowy pierwiastków śladowych pomiędzy trzy podstawowe fazy odpadów, tj. matrycę glinokrzemianową, kwarc i spinele, wskazuje na nierównomierny rozkład większości pierwiastków: Zn, Pb, Cd, Cr i Cu. Jedynie As przypisany jest głównie fazie glinokrzemianowej, a Hg kwarcowi.

LITERATURA

1. Chodyniecka L., Kapuściński T.: Podstawowe metody rozpoznawania minerałów i skał. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
2. Domka F.L., Kwiatkowska B., Walenciak M.: Z pyłów powstałe. Popioły lotne - mariaż ekologii i ekonomii. Ekoprofit nr 1, styczeń-marzec 2007.
3. Kapuściński T., Strzałkowska E.: Ługowalność pierwiastków podstawowych i śladowych z odpadów paleniskowych lokowanych w wyrobiskach górniczych. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 21 zeszyt 3, 2005.
4. Ratajczak T., Gawel A., Górniak K., Muszyński M., Szydłak T., Wyszomirski P.: Charakterystyka popiołów lotnych ze spalania niektórych węgla kamiennych i brunatnych. Polskie Towarzystwo Mineralogiczne - Prace Specjalne z.13, 1999.
5. Zajusz – Zubek E., Kaleta D.: Analiza specyjalna połączeń metali ciężkich w popiołach lotnych pochodzących ze spalania węgla. Karbo nr 2, 2004.