

Andrzej ŁUSZCZKIEWICZ*
Czesław MAZANEK**

POZYSKIWANIE KONCENTRATÓW MINERAŁÓW CIĘŻKICH Z ALUWIÓW PRZEDSUDECKICH NA PRZYKŁADZIE ZŁOŻA "PROSZKOWICE"

Przedstawiono historię pozyskiwania i badań minerałów ciężkich w złóżach okruchowych Dolnego Śląska związanych z aluwiami Sudeckimi. Przedstawiono szacunki zasobów w stawach osadowych oraz koncepcje technologii pozyskiwania minerałów ciężkich na przykładzie jednego ze składowisk piasków po płukaniu żwirów. Stwierdzono techniczną możliwość i ekonomiczną opłacalność produkcji cyrkonu, ilmenitu, rutylu i monacytu z odpadowych piasków po płukaniu żwirów.

1. Wprowadzenie

Jako aluwia przedsudeckie autorzy definiują teren leżący w obrębie zlewni lewobrzeżnej Odry i obejmujący zlewnie Nysy Kłodzkiej, Kaczawy, Bobru, Kwisy i Nysy Łużyckiej. Na terenie tym znajduje się ponad 170 udokumentowanych i zarejestrowanych w bilansie Zasobów Polski złóż kruszywa naturalnego, z których 70 jest w trakcie eksploatacji (Centr. Urząd Geol. 1986). Świderski i Łuszczkiewicz (1984) na zlecenie COBGO "Poltegor" przebadali piaski z 35 Dolnośląskich złóż kruszyw i zakładów je eksploatujących. Stwierdził on w kilkunastu przypadkach interesujące jakościowo i ilościowo koncentracje minerałów ciężkich. Bałchanowski i Rydzewski (1987) opracowując projekt prac badawczych dla oceny występowania i wykorzystania minerałów ciężkich w eksploatowanych złóżach kruszywa naturalnego na Dolnym Śląsku zauważyli iż dotychczas w ocenie przydatności kruszyw nie prowadzono badań nad minerealami ciężkimi w tych złóżach i aktualnie prowadzone prace dokumentacyjne

*Instytut Górnictwa, Politechnika Wrocławska, 50-370 Wrocław.

**Instytut Chemii Nieorganicznej i Metalurgii Pierwiałków Rzadkich, Politechnika Wrocławska, 50-370 Wrocław.

również nie biorą pod uwagę zawartości w nich minerałów ciężkich.

Historycznie rzecz biorąc, jedynymi znanymi złóżami rozsypiskowymi na tym terenie były złóża złota. Jak podaje za Quiringiem Domaszewska (1984), przypuszczalnie złoto wydobywane było tu już 2000 lat p.n.e. przez Kreteńczyków, o czym zdaniem badaczy świadczą znajdowane w czasie badań archeologicznych miedziane kopaczki podobne do znanych z Krety. W IV i III wieku p.n.e. górnictwem złota zajmowali się Celtowie a ślady ich dawnych robót w górach Sowich i okolicach Karpacza były cenną wskazówką dla wczesnośredniowiecznych poszukiwaczy. Pierwsze bowiem pisane źródła o eksploatacji złota na Dolnym Śląsku pochodzą z XII w. i dotyczą rejonów Lwówka Śląskiego i Złotoryji. Górnictwem złota z osadów trzeciorzędowych w tych rejonach zajmowała się ludność słowiańska a później sprowadzeni górnicy walońscy i Niemieccy. Eksploatacja złota w rejonie Lwówka trwała ok. 100 lat a w okolicach Złotoryi ok. 200 lat, a upadek wydobywania nastąpił w latach 1340-45 w wyniku wyczerpania złóż. Odkrycie bogatych pól złotonosnych w Mikołajowicach, Wądrożu Wielkim i Legnickim Polu, wywołało prawdziwą gorączkę złota w r. 1343. Po 30 letnim rozkwicie, górnictwo złota na tym obszarze stało się nieopłacalne głównie na skutek trudnych warunków hydrogeologicznych (Domaszewska, 1984). W późniejszych wiekach wielokrotnie ponawiano próby wznowienia górnictwa złota ze złóż rozsypiskowych, jednak zarówno poszukiwania nowych złóż jak i wysiłki zmierzające do uruchomienia opłacalnej eksploatacji na starych złóżach nie przyniosły spodziewanych rezultatów. Czynione w XIX i na początku XX w. liczne rozpoznania obecności złota na Dolnym Śląsku wskazują, że przeciętne zawartości złota wahają się od 0,2 do kilku g/t. (Domaszewska, 1984). Uznawano je wówczas za zawartości niskie i nieopłacalne natomiast dziś zdaniem niektórych autorów, wobec współczesnej techniki przerobczej mogą okazać się bardzo interesującymi. Szczegółowy opis wystąpień złota na Dolnym Śląsku można znaleźć w monografii Grodzickiego (1972).

2. Oceny występowania minerałów ciężkich w aluwialach dolnośląskich

Badania minerałów ciężkich w aluwialach rzek sudeckich wykonywane były jedynie fragmentarycznie w ramach tzw. zdjęć szlichowych wybranych obszarów np. Jęczmyk (1979), Jęczmyk, Kanasiewicz (1970), bądź też w analizach szlichowych w ramach badań nad metalogenezą Sudetów (Kanasiewicz, Bałchanowski i in. 1985). Stąd mimo udokumentowania zasobów ponad 3 mld Mg kruszyw mineralnych na Dolnym Śląsku nic nie było wiadomo o jakości i ilości występujących w tych złóżach minerałów ciężkich. Aktualnie na Dolnym Śląsku eksploatuje się około 70 złóż okruchowych dostarczających rocznie w sumie ponad 20 mln Mg piasków i

kruszyw budowlanych, piasków szklarskich, formierskich i podsadzkowych oraz żwirków filtracyjnych, przy czym zdecydowaną przewagę stanowią złoża żwiru pozyskiwanego dla przemysłu budowlanego. Są to przeważnie mieszanki żwirowo-piaszczyste zwane pospólkami. Największe z tych złóż eksploatowane są metodą podwodną przy pomocy jednostek pływających. Wydobytý materiał jest transportowany do zakładu przerobczego gdzie jest przesiewany na mokro. Woda po odmyciu materiału na przesiewaczach stanowiąca zawiesinę, muiów i drobnoziarnistych piasków jest odprowadzana do stawów osadowych. Osad zdeponowany w stawach może być znaczącym gospodarczo źródłem minerałów ciężkich.

Stosując oznaczenie minerałów ciężkich w cieczy ciężkiej (czterobrometan, $2,98\text{g/cm}^3$) oraz wydzielając koncentraty tych minerałów wzbogacając próbki 50-100kg drobnoziarnistego piasku na laboratoryjnym stole koncentracyjnym, Łuszczkiewicz (1988) wytypował 11 zakładów płukania żwirów, z których odpady zawierają interesujące koncentracje ilmenitu, cyrkonu i monacytu. W tabeli 1 zestawiono szacunkowe ilości tych minerałów w wspomnianych wybranych 11 przypadkach z 35 przebadanych przez autora złóż i odpadów po płukaniu żwirów.

Tab.1. Szacunek ilości minerałów ciężkich pozostających rocznie w odpadach po płukaniu kruszyw (według danych roku 1987 i 1988)

Lp.	Nazwa zakładu (złoże)	Ilość * materiału -0.5mm [Mg]	Zawartość min. cięż. w mat. -0.5 [%]	Ilość miner. ciężkich [Mg]	Ilość ** konc. miner. cięż. [Mg]
1.	Proszkowice	8.000	5.3	407	285
2.	Mietków	80.000	3.0	2400	1680
3.	Paczków	40.000	3.0	1200	840
4.	Pilce	46.000	2.2	1000	700
5.	Rakowice	92.000	3.7	3312	2318
6.	Bolesławiec	44.000	1.0	440	308
7.	Olszna	140.000	0.5	700	490
8.	Rokitki	5.000	1.3	38	26
9.	Kozielnio	55.000	2.0	1100	770
10.	Wójcice	80.000	4.0	3200	2240
11.	Głębocko	100.000	1.9	1900	1330
	Razem			15807	11064

Uwagi:

- * - w badaniach przyjęto, że w klasie -0.5 znajdują się wszystkie minerały ciężkie. Ilość tej klasy w urobku określono na podstawie rocznego wydobycia i średnich rocznych składów ziarnowych urobku.
- ** - prawdopodobne ilości koncentratów grawitacyjnych przyjęto przy założeniu, że uzysk frakcji minerałów ciężkich w procesie wzbogacania grawitacyjnego wynosi 70 %.

Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu stosując metodę szlichowania piasków określiło ilości minerałów ciężkich w produktach

przeróbki 16 czynnych zakładów w roku 1987 (Bałchanowski, Rydzewski 1988) co przedstawiono w tabeli 2.

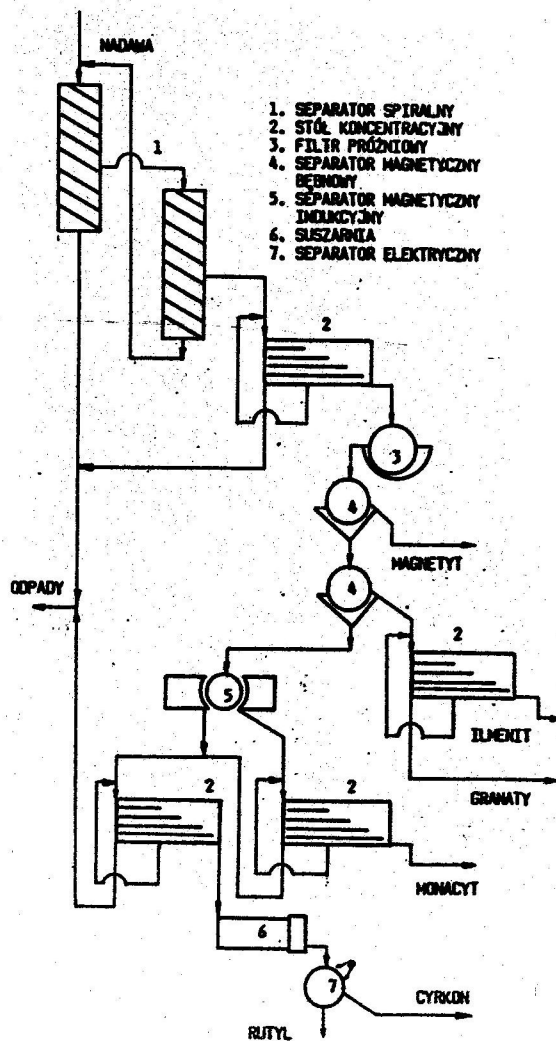
Tab.2. Minerale ciężkie w produktach przerobu kruszyw naturalnych wybranych zakładów w roku 1987.

Złoże	Zasoby geologiczne (m ³)	Minerały ciężkie Mg
Bolesławice	8750000	108,0
Zagań	820000	113,0
Nowogród	15295000	101,0
Rokitki	3700000	7,2
Szczytniki	40000000	27,2
Mietków	25000000	100,8
Proszkowice	1200000	73,3
Głębocko	7050000	357,0
Wojanów	759000	290,0
Sędziszów	110000	60,0
Bierkowice	3000000	18,0
Pilice	49021000	462,0
Pomianów-Topola	10367000	858,0
Kozielec	4450000	624,0
Wójcice	60000000	575,0
Razem	229522000	3774,3

Otrzymanych wyników można się było z dużym prawdopodobieństwem spodziewać; zmineralizowany, krystaliczny masyw Sudetów w wyniku procesów wietrzenia dostarczył na swoje często dalekie przedpola materiału okruszowego który dziś stanowi tą właśnie bazę surowcową najwyższej jakości kruszyw naturalnych (Siliwończuk 1974; Buksiński, Cegła 1979). Akcesoryczne najbardziej odporne chemicznie minerały skał magmowych Sudetów musiały się tam również znaleźć. Wiele danych literaturowych wskazuje iż rozsypiska żwirowo-piaszczyste eksploatowane głównie dla celów budowlanych stają się na świecie cennym źródłem wielu minerałów (Polkin 1968, Polkin 1987). W USA na przykład od dawna wykorzystywano takie złoża dla pozyskiwania złota i platyny a aktualnie bilansowane są w nich również minerały ciężkie. W Kalifornii (Gomes et al. 1979, Gomes et al. 1980) rozpoczęto pozyskiwanie ilmenitu, cyrkonu, chromitu i magnetytu ze złóż żwirów budowlanych; uruchomiony został także na dużą skalę odzysk minerałów ziem rzadkich z odpadów kilku zakładów płukania kruszyw naturalnych w Kalifornii i Teksasie z dużym sukcesem ekonomicznym (Hedrick 1986).

3. Koncepcja pozyskiwania minerałów ciężkich

Początek prac nad otrzymywaniem koncentratów minerałów ciężkich w Polsce miał miejsce w latach 50-tych i dotyczył wrywkowych obszarów piaszków plażowych wybrzeża Bałtyku. Opracowano i sprawdzono w skali laboratoryjnej metodę wydzielania koncentratów minerałów ciężkich oraz ich rozdzielenie na drodze separacji magnetycznej, elektrycznej oraz flotacji (Akerman i in. 1958, Głowacz i in. 1963). Studia i badania, szczególnie dotyczące możliwości eksploatacji złóż minerałów ciężkich Bałtyku południowego - w tym ławic: Odrzanej i Skupskiej - były następnie kontynuowane w latach 70-tych. Prof. Albin Czernichowski zorganizował wiosną 1981 konferencję podsumowującą stan wiedzy w tym zakresie, z której kompletne materiały zostały wydane przez Politechnikę Wrocławską (Eksploatacja złóż minerałów ciężkich, 1984). Zamierzenie organizatora że konferencja ta stanie się impulsem w kwestii pozyskiwania tych ważnych surowców niestety nie zrealizowało się. Tym niemniej prace nie zostały przerwane; Zakład Przeróbki Kopalni Politechniki Wrocławskiej kontynuował prace badawcze związane z południowym Bałtykiem (Łuszczkiewicz, 1983), rozpoczął badania obecności minerałów ciężkich w eksploatacyjnych złóżach



Rys.1. Schemat przeróbki piaszków założony do obliczeń ekonomicznych

okruchowych Dolnego Śląska (Świderski, Łuszczkiewicz, 1984) a także podjął problem odzysku minerałów ciężkich z odpadów po oczyszczaniu piasków szklarskich (Łuszczkiewicz 1987). Jednocześnie prowadzone były prace nad rozdziałem frakcji minerałów ciężkich. W roku 1983 do badań wzbogacania piasków Bałtyckich włączył się Instytut Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej (Steinhoff, Kurzyca, 1985).

W roku 1987, w związku z pogłębiającym się deficytem metali i związków ziem rzadkich w polskiej gospodarce zintensyfikowano prace nad poszukiwaniem krajowego surowca dla ich otrzymywania. Zwrócono wówczas uwagę iż odpady z płukania żwirów stanowią mogące znaczące źródło monacytu i przedstawiono opracowaną na podstawie szerokich badań laboratoryjnych koncepcję technologii jego pozyskiwania (Łuszczkiewicz i inni, 1988). Dokonano także oceny techniczno-ekonomicznej proponowanej metody (Żmudziński i inni, 1988). Wykazano, iż ilości minerałów ciężkich, ich skład oraz proponowana technologia znajdująca odbicie w roboczo przyjętym schemacie technologicznym ilościowym i maszynowym dla wzbogacania grawitacyjnego oraz jego rozdziału na koncentraty ilmenitu, cyrkonu, monacytu, rutilu i granatów gwarantują ekonomiczną opłacalność przedsięwzięcia przy uruchomieniu eksploatacji odpadów zalegających w wielu stawach. Uproszczony opis technologii przyjętej do obliczeń ekonomicznych przedstawiono na roboczym schemacie maszynowym wzbogacania odpadów piaskowych (rys. 1). Założono, że wskaźniki wzbogacania będą kształtować się następująco:

1. Wzbogacanie wstępne odpadów piaskowych o zawartości 3% minerałów ciężkich: wychód koncentratu o zawartości 90% minerałów ciężkich = 1,7% przy uzysku ilmenitu, cyrkonu, monacytu i rutilu 85-90%.

2. Rozdział koncentratu wstępnego:

	wychód %	uzysk %
Konc. magnetytowy (Fe 80%)	4,2	90
Konc. ilmenitowy (TiO_2 45%)	14,2	85
Konc. monacytowy (Ti_2O_3 45%)	2,7	80
Konc. cyrkonowy (ZrO_2 80%)	5,7	85
Konc. rutilowy (TiO_2 85%)	1,9	80

Dane te przyjęto przy uwzględnieniu charakterystyki piasku i koncentratu z 11 wspomnianych wcześniej zakładów.

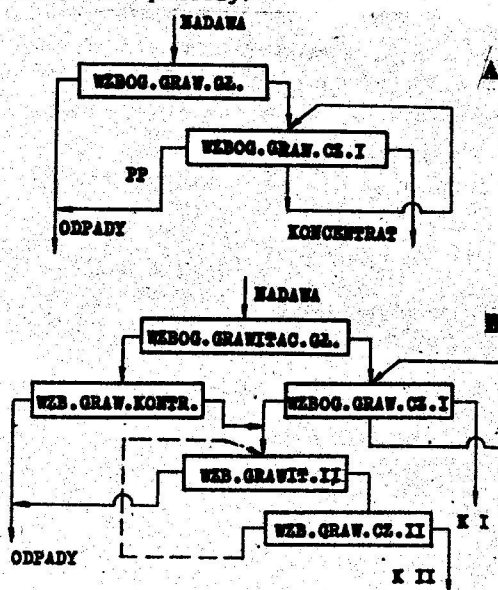
Oszacowany poziom granicznej ceny produktów spełniającej wymogi efektywności nie przekracza poziomu cen w ewentualnym imporcie takich produktów. Istnieje zatem tzw. rezerwa wartościowa co jest objawem bardzo korzystnym. Z obliczeń wynika, że zdyskontowana nadwyżka efektów

w okresie obliczeniowym ($m=12$ lat) wyniesie około 400 mln. zł. Zaciągnięcie ewentualnego kredytu na cele inwestycyjne pozwoliłoby wygospodarować środki na spłatę odsetek i zwrot wydatków kapitałowych w korzystnym okresie najdalej 8 lat. Tzw. syntetyczny poziom efektywności wyrażany wskaźnikiem E wynosi 1,16-1,66 zł/zł co daje podstawę do stwierdzenia, że dalsze uściślenia techniczno-ekonomiczne nie zlikwidują przewidywanej nadwyżki efektów w wypadku wzrostu wydatków kapitałowych.

4. Weryfikacja koncepcji

Weryfikacji opracowanej technologii (procedury) postanowiono dokonać na materiale pochodzącym ze stawu osadowego w którym zeskładowane są odpady drobnoziarniste po przerobie materiału (żwiru i żwirki) ze złóża "Proszkowice". Wybór tego złóża został dokonany głównie z uwagi na możliwości techniczne przeprowadzenia na miejscu badań w skali przemysłowej - jednocześnie jednak procent frakcji minerałów ciężkich w odpadzie plasował to złóża w grupie średnich zawartości co stwarzało możliwość ekstrapolacji osiąganych wyników na inne złóża. Jednocześnie zawartość w koncentracie minerałów ciężkich poszczególnych minerałów z dużym przybliżeniem można również traktować jako średnie choć anomalna zawartość granatów trochę temu przeczy.

Wykonano dwa eksperymenty wzbogacania grawitacyjnego z wielotonowymi próbami piasku, pierwszy poza zakładem w Proszkowicach (próba 12Mg) i drugi już na miejscu w ruchu ciągłym. W pierwszym eksperymencie materiał pobrany ze stawu osadowego w Proszkowicach poddano wzbogacaniu grawitacyjnemu na przemysłowym sześciopokładowym (2x3) stole koncentracyjnym typu ISK-1, jednym z nitki oczyszczania piasków szklarskich w zakładzie w Osiecznicy. Materiał wzbogaczono według schematu pokazanego na rys. 2a. Ze względu na niemożność, w warunkach zakładu w Osiecznicy, zawrotu półprodu-



Rys. 2. Schematy doświadczeń wzbogacania piasku z Proszkowic na przemysłowym stole koncentracyjnym

ktu PP II i kontrolnego wzbogacenia odpadów pobrano próbki tych produktów i doczyszczano je na laboratoryjnym stole koncentracyjnym. Otrzymane i zesumowane w postaci jednego bilansu wyniki wszystkich operacji pozwoliły ocenić proces jak przebiegający z symulowanym obiegiem zamkniętym półproduktów i jako najbardziej zbliżony do procesu ciągłego (rys. 2b). Bilans tej operacji zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Bilans próby wzbogacania grawitacyjnego na stole koncentracyjnym w obiegu zamkniętym półproduktów. Piasek z ZEK Proszkowie.

Prod	γ %	f.m.c		TiO ₂		ZrSiO ₃		TR ₂ O ₃		Fe	
		λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %
K I	1.23	96.21	37.00	13.62	57.43	7.60	78.26	1.68	86.15	19.55	43.02
K II	0.83	77.60	20.13	9.28	26.40	2.78	19.21	0.40	13.38	16.81	24.96
pp	4.46	4.96	6.92	0.24	3.67	0.01	0.33	0.00	0.41	0.66	5.27
O	93.48	1.23	39.95	0.039	12.50	0.00	2.20	0.00	0.06	0.16	26.75
Nobl	100.0	3.20	100.0	0.29	100.0	0.120	100.0	0.023	100.0	0.56	100.0
Nozn		2.97		0.28		0.131		0.011		0.60	

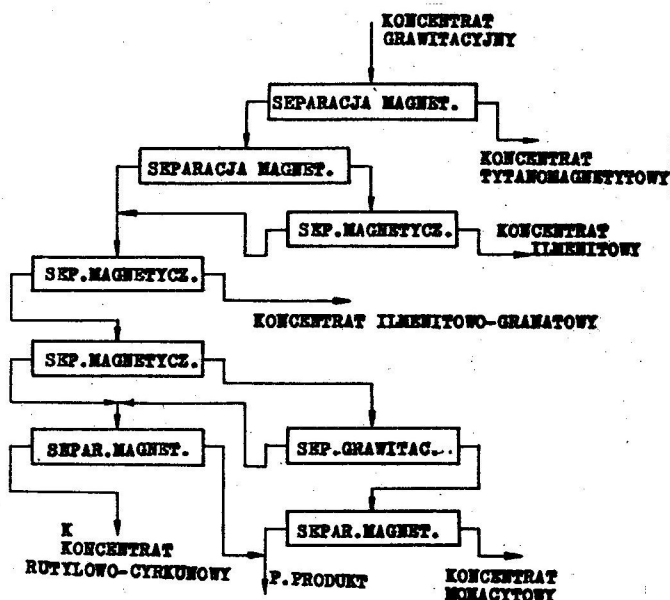
λ - zawartości rzeczywiste w produkcie, %

Otrzymany koncentrat grawitacyjny (96% frakcji minerałów ciężkich) poddano rozdziałowi separacją magnetyczną na przemysłowym separatorze indukcyjnym wałkowym typu Boxmag-Rapid w Zakładzie Doświadczalnym "Hydromet" w Kowarach (rys. 3D). W operacjach tych jedynie koncentrat monacytowy doprowadzono do czystości handlowej, pozostałe produkty wymagały doczyszczania. Bilans separacji magnetycznej pokazano w tabeli 4.

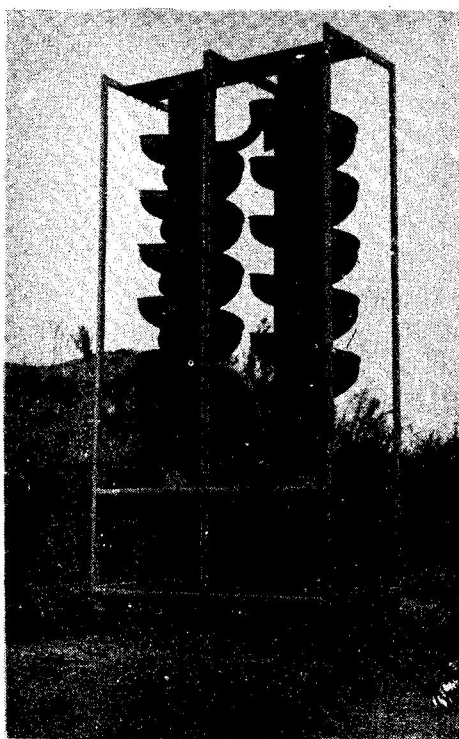
Tab. 4. Bilans separacji magnetycznej koncentratu grawitacyjnego z Proszkowie.

Produkt	γ %	TiO ₂		ZrSiO ₄		TR ₂ O ₃		Fe	
		λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %	λ , %	ϵ , %
Konc. tytanomagnetytowy	5.56	15.93	5.94	0.39	0.25	-	-	52.21	13.97
Konc. ilmenitowy	10.03	46.70	31.43	0.53	0.40	-	-	36.10	17.42
Konc. ilmenito-wo-granatowy	54.35	11.35	41.38	1.12	6.99	0.05	1.41	23.30	60.92
Konc. monacytowy	3.51	0.75	0.19	1.05	0.42	46.22	84.05	3.28	0.55
Prod. pośredni	10.21	8.10	5.55	10.58	12.40	2.59	13.70	12.93	6.35
Konc. rutyl-cyrkon	16.34	14.16	15.52	42.60	79.93	0.1	0.84	1.0	0.79
Nadawa obl.		14.90		8.71		1.93	100.0	20.80	100.0
Konc. grawit. ozn.		14.73		8.72		1.94		22.52	

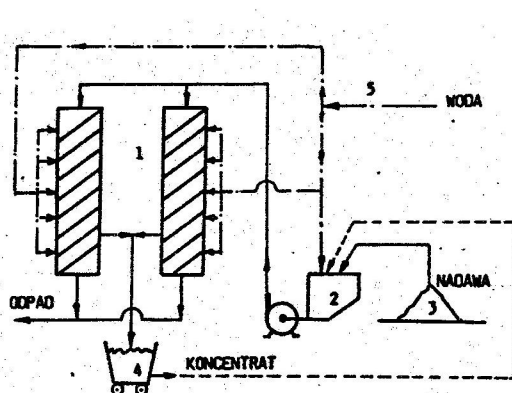
Rys.3. Schemat rozdziału koncentratu grawitacyjnego po stole koncentracyjnym



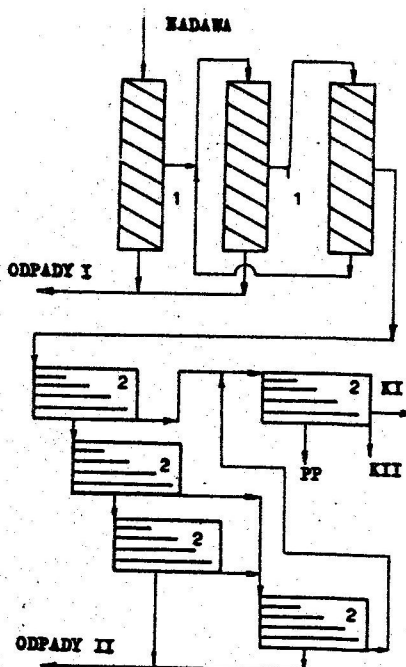
Te pozytywne wyniki skłoniły autorów do zaprojektowania i budowy eksperymentalnej instalacji półtechnicznej opartej o przemysłowych rozmiarów separatory strumieniowo-zwojowe. Wykonano projekt i zbudowano dwa takie separatory z tworzywa epoksydowego na osnowie włókna szklanego (fotografia, rys 4). Separatory te składające się z pięciu pojedynczych zwojów o średnicy 700mm zainstalowano w pobliżu miejsca zrzutu odpadów po płukaniu żwirów w Proszkowicach w układzie pokazanym schematycznie na rys. 5. Materiałem do badań był piasek pobierany ze stawu osadowego, z plaży powstałej z materiału składowanego od wielu lat, zawierający według oznaczeń w czterobromoetanie 2,8% frakcji minerałów ciężkich.



Rys. 4. Separatory strumieniowo-zwojowe

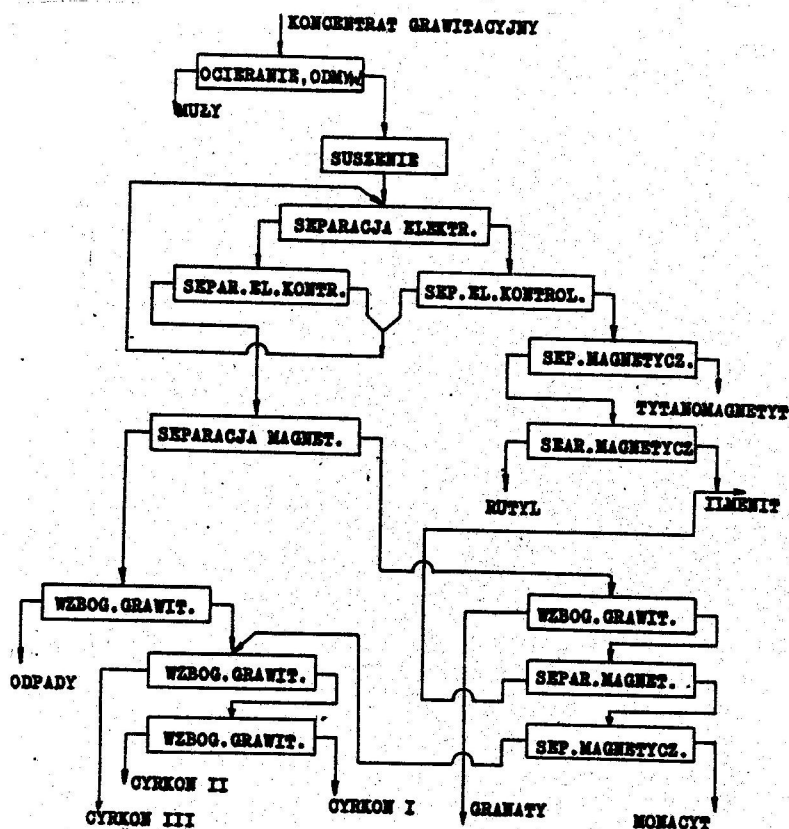


Rys. 5. Schemat wykonanych eksperymentów w Proszkowicach



Rys. 6. Schemat wykonanych operacji w skali półtechnicznej.
1-separatory spiralne (rys. 5)
2-stół koncentracyjny

W trakcie pracy instalacji po ustabilizowaniu parametrów procesu stwierdzono, że stopień wzbogacania frakcji minerałów ciężkich (ogólnej) wynosi 10 zatem otrzymywano koncentraty zawierające około 30% tej frakcji. Koncentrat ten został następnie doczyszczony na stole koncentracyjnym do zawartości 97% frakcji minerałów ciężkich. Schemat całości procesu wzbogacania grawitacyjnego przedstawiono na rys. 6. W trakcie doczyszczania odbierano z krawędzi stołu produkt KI wzbogacony w najcięższe minerały głównie monacyt, którego z uwagi na wyraźną radioaktywność nie połączono z głównym koncentratem grawitacyjnym. Główny końcowy koncentrat grawitacyjny poddano operacji ocierania i odmywania zanieczyszczeń a następnie suszeniu. Tak przygotowany koncentrat grawitacyjny poddano rozdziałowi metodami separacji elektrycznej a następnie magnetycznej na koncentraty poszczególnych minerałów, które następnie doczyszczono zgodnie ze schematem przedstawionym na rys 7.



Rys. 7. Schemat rozdziału koncentratu grawitacyjnego

W tabeli 5 zestawiono wyniki wszystkich operacji wzbogacania grawitacyjnego. Tabela składa się z dwóch części: dolnej przedstawiającej bilans wzbogacania wstępnego na separatorze strumieniowo-zwojowym (Lp 6-8) oraz części górnej dotyczącej doczyszczania koncentratu na stole koncentracyjnym. Lp 5 jest nadawą na stół koncentracyjny wynikającą z bilansu wzbogacania na stole a ta sama nadawa oznaczona jest w wierszu Lp 6 jako koncentrat wstępny z separatora strumieniowo-zwojowego. Oznaczenia zawartości głównych składników użytecznych wykonano dla koncentratów I i II bezpośrednio w próbkach tych koncentratów natomiast wszystkie pozostałe zawartości w produktach oznaczono we frakcjach minerałów ciężkich wydzielanych w czterobromoetanie z uśrednionych próbek tych produktów. Taka procedura gwarantowała wysoką dokładność oznaczeń chemicznych. Oznaczanie pierwiastków we frakcjach minerałów ciężkich przeliczano na rzeczywiste zawartości w produktach.

Tab. 5. Bilans wzbogacania grawitacyjnego piasków odpadowych z płukania żwirów z Proszkowic pozycje:

Lp 6,7,8-dotyczą wzbogacania w separatorze strumieniowo-zwojowym
 Lp 1,2,3,4,5-dotyczą doczyszczania koncentratu wstępnego (Lp 6) na stole koncentracyjnym.

Lp	Produkt	γ %	f.m.c		ZrSiO ₄		TR ₂ O ₃		TiO ₂	
			λ, %	ε, %	λ, %	ε, %	λ, %	ε, %	λ, %	ε, %
1.	Konc. graw. I	1.1	98.0	3.62	30.15	12.39	10.41	22.83	11.90	3.00
2.	Konc. graw. II	23.8	97.0	77.62	9.34	83.02	1.45	68.81	14.96	81.45
3.	Półprodukt	6.4	48.21	10.37	1.10	2.63	0.467	5.97	6.85	10.03
4.	Odpad II	68.7	3.63	8.38	0.076	1.96	0.017	2.39	0.35	5.52
5.	Nadawa na stół konc. z bilansu	100.0	31.43	100.0	2.653	100.0	0.503	100.0	4.37	100.0
6.	Konc. wst. (spiralna)	5.10	29.71	53.10	2.32	85.40	0.525	80.04	4.15	71.50
7.	Odpad (spiralna)	94.90	1.41	46.90	0.021	14.60	0.007	19.96	0.089	28.50
	Nadawa z bilansu (rzecz.)	100.0	2.85	100.0	0.138		0.034		0.296	
	(f.m.c.)				4.86*		1.18*		10.38*	
	Nadawa oznacz. (rzecz.)		2.98		0.140		0.036		0.288	
	(f.m.c.)				4.71*		1.21*		9.68*	

* - zawartości we frakcji minerałów ciężkich

Porównując koncentraty grawitacyjne opisane w tabelach 3 i 5 można zauważyć są one (KI+KII) jakościowo bardzo podobne do koncentratów otrzymanych tylko na stole koncentracyjnym oznaczają się jednak wyższym uzyskiem szczególnie cyrkonu i monacytu ; wynika to z możliwości dokładniejszego prowadzenia procesu na stole koncentracyjnym.

Rozdział koncentratu grawitacyjnego (KII, tabela 5) przeprowadzono inaczej niż rozdział opisany w tabeli 4 i na rys 3. Pierwszą i główną operacją rozdziału była separacja elektryczna (rys 7) następnie produkty separacji elektrycznej rozdzielono magnetycznie. Operacje te wykonano na urządzeniach Instytutu Przeróbki Kopalni Politechniki Śląskiej. (separator elektryczny ulotowy bębnowy, separator magnetyczny typu Jones). Wybór takiego sposobu rozdziału miał na celu porównanie dwóch różnych możliwych do zastosowania metod rozdziału. Upoważniał do tego nietypowy skład koncentratu grawitacyjnego, w którym stwierdzić można zarówno przewagę składników magnetycznych (ilmenit+granaty) jak i

składników nie przewodzących (granaty + cyrkon + monacyt).

Obie metody rozdziłu dały podobne wyniki jednak separacja elektryczna jako operacja główna charakteryzowała się gorszą selektywnością niż taka sama operacja separacji magnetycznej w przypadku cyrkonu i monacytu. Zaznacza się to szczególnie przy porównywaniu uzysków. Wyjaśnia ten fakt skład ziarnowy koncentratów grawitacyjnych. Okazało się, że ponad 50 % monacytu i około 40 % cyrkonu (liczonych jako uzyski) trafia do klasy ziarnowej poniżej 0.04 mm. Taki materiał należałoby uznać za niezbyt nadający się do rozdziłu metodami magnetycznymi (suchymi) i elektrycznymi, zatem osiągnięte wyniki należy uznać za bardzo korzystne choć nie jest wykluczonym, że np. flotacja dałaby lepsze wyniki. Otrzymane koncentraty końcowe odznaczały się następującymi składami chemicznymi:

1. Koncentrat magnetytowy (ze względu na wysoką zawartość TiO_2 należałoby uznać go za tytanomagnetytowy):
 53.4 % Fe, 19.1 % TiO_2 , 0.11 % ZrO_2 , 0.14 % TR_2O_3
2. Koncentrat cyrkonowy I :
 62.1 % ZrO_2 , 0.5 % TiO_2 , 0.20 % FeO, 0.10 % TR_2O_3
3. Koncentrat ilmenitowy :
 48.2 % TiO_2 , 36.0 % FeO, 0.10 % ZrO_2 , <0.10 % TR_2O_3
4. Koncentrat rutowy :
 84.7 % TiO_2 , 7.8 % FeO, 2.40 % ZrO_2 , 0.15 % TR_2O_3
5. Koncentrat monacytowy :
 51.3 % TR_2O_3 , 2.25 % ThO_2 , 0.37 % ZrO_2 , 0.2% TiO_2 , 0.3 % Fe

5. Ocena możliwości wykorzystania odpadów po wzbogacaniu grawitacyjnym .

Jak widać z tabeli 3 i tabeli 5 wzbogacając metodą grawitacyjną piaski odpadowe należy się liczyć, że powstanie niemal taka sama ilość odpadów grawitacyjnych jak ilość nadawy wziętej do wzbogacenia. Problem utylizacji tego odpadu w zasadzie mógłby nie istnieć. Odpady te można by kierować z powrotem do osadnika, z którego je pobrano. Jednakże odpady po stole koncentracyjnym (jak po każdym innym urządzeniu do wzbogacenia grawitacyjnego) stają się materiałem znacznie przetworzonym w stosunku do nadawy. Przede wszystkim materiał jest sklasyfikowany - usunięto z niego wszelkie zanieczyszczenia +0.5 mm (lub +1.0 mm) oraz jest w dużym stopniu odmulony gdyż krążące wody obiegowe będą zabierać większość składników ilastych. Zatem po przeróbce drobnoziarnistych piasków powstanie przemyty materiał odmulony i pozbawiony ziarn +0.5 mm. Taki materiał może znaleźć zastosowanie w budownictwie. Okazuje się,

że budownictwo cierpi na ostry deficyt takiego materiału. Piaski o uziarnieniu -0. 5 mm są niezbędne jako domieszka zapewniająca szczelność betonów a także ich mrozoodporność i małą nasiąkliwość. Brak takiego dodatku w tynkach jest przyczyną niskiej ich jakości i w efekcie przynębiającego często obrazu naszych miast.

W ramach tej pracy wykonano badania (Kluczevska, 1988) mające określić przydatność odpadu po wzbogacaniu grawitacyjnym piasków do stosowania w budownictwie na przykładzie zapraw tynkarskich i wyrobów drogowych takich jak płytki chodnikowe i krawężniki. Wykazano, że dodatek badanego piasku do produkcji tynków i szczelnych betonów jest niezwykle korzystny w porównaniu ze stosowanym powszechnie dodatkiem piasku kopanego. Szczegółowe wnioski z cytowanej pracy Kluczevskiej (1988) przedstawiono w następujących 5 punktach:

1. Ilość odmytego piasku odpadowego nie może przekroczyć w zaprawach tynkarskich 10 % ogólnego składu kruszyw ze względu na skurcz zaprawy i spękanie powierzchni tynków. Dodatek 10% piasku odpadowego poprawił urabialność zaprawy oraz polepszył wygląd jej powierzchni i jej gładkość. Obniżył nasiąkliwość tynku i wpłynął na wzrost wytrzymałości zaprawy.
2. Dodatek 10% piasku odpadowego do betonu dwukrotnie obniżył nasiąkliwość płytek chodnikowych, zbliżając ją do wymagań normowych, co przy stosowaniu tradycyjnych kruszyw nie było możliwe. Należy podkreślić, że pozostałe parametry badanych płytek (jak np. wytrzymałość) nie uległy pogorszeniu i są zgodne z wymaganiami normy.
3. Dodatek 10 % piasku odpadowego do betonu pozwala na niebagatelną oszczędność cementu. Wyżej wymienione bardzo dobre parametry płytek chodnikowych uzyskano przy oszczędności ok. 15 % cementu tj. o 70 kg mniej cementu na 1 m³ betonu.
4. Wydaje się celowym zwiększenie dodatku piasku odpadowego w celu znalezienia optymalnego składu betonu przy obniżeniu jego nasiąkliwości poniżej 4% i przy zachowaniu innych parametrów jakościowych i technologicznych dla dalszej oszczędności cementu.
5. Należy rozważyć możliwość zastosowania piasku odpadowego do innych wyrobów betonowych np. :
 - do uszczelniania betonów hydrotechnicznych (tamy, jazy itp.) - brak środków uszczelniających typu "Hydrobet " stanowiących często produkcję odpadową lub z tzw. "wkładem dewizowym ",
 - do wylewania podłóg z tworzyw sztucznych (np. do podłóży żywicznych).

Tab. 6. Wyniki zbiorczej separacji magnetycznej produktów separacji elektrycznej (rys. 7)

	γ %	TiO_2		ZrSiO_4		TR_2O_3		ThO_2		Fe	
		$\lambda, \%$	$\epsilon, \%$	$\lambda, \%$	$\epsilon, \%$	$\lambda, \%$	$\epsilon, \%$	$\lambda, \%$	$\epsilon, \%$	$\lambda, \%$	$\epsilon, \%$
1.	3.2	19.4	3.98	0.16	0.05	0.14	0.43	-0.01	0.60	53.40	8.12
2.	25.2	48.2	78.82	0.10	0.27	-0.1	2.43	-0.01	4.74	31.41	37.60
3.	1.00	84.7	5.50	2.40	0.26	0.15	0.14	-0.01	0.19	6.12	0.28
4.	48.3	2.4	7.52	0.15	0.78	0.3	13.99	0.02	18.17	20.26	46.48
5.	1.5	0.1	0.01	0.28	0.04	51.27	74.25	2.25	63.48	0.31	0.02
6.	1.5	0.8	0.05	98.00	15.69	0.1	0.14	-0.01	0.28	0.22	0.02
7.	1.4	3.2	0.29	93.80	14.02	0.2	0.27	0.06	1.58	0.38	0.03
8.	7.5	6.5	3.16	84.50	67.66	0.6	4.34	0.05	7.05	4.43	1.58
9.	10.4	1.0	0.67	1.10	1.23	0.4	4.01	0.02	3.91	11.90	5.88
10.	N. bil.	15.41		9.37		1.04		0.05		21.05	
11.	N. ozn.	14.96		9.34		1.45		0.07		21.51	

λ - zawartości rzeczywiste w produkcie, %

6. Podsumowanie

Zakład eksploatujący i przerabiający kruszywo w Proszkowicach jest zakładem małym w skali pozyskiwania surowców okruchowych na Dolnym Śląsku. Jest on jednak zakładem typowym i otrzymane wyniki i bilanse minerałów ciężkich można przenieść w mniejszym lub większym stopniu na wiele innych zakładów, dokonać tambilansów minerałów ciężkich i ocenić możliwość ich pozyskiwania.

Prawdopodobne ilości minerałów ciężkich możliwych do pozyskania w postaci koncentratów grawitacyjnych na tle zasobów i produkcji kruszyw na Dolnym Śląsku w oparciu o wyniki uzyskane ze wzbogacenia próbek piasków na laboratoryjnym stole koncentracyjnym i na podstawie oznaczeń minerałów ciężkich - przedstawiono w tabeli 1.

Otrzymane rezultaty rozdziału kolektywnego koncentratu grawitacyjnego metodami magnetycznymi i elektrycznymi (tablica 4 i 6) potwierdzają znany z literatury i praktyki światowej fakt bardzo korzystnych przerobczo własności surowców okruchowych. Można zatem spodziewać się podobnego przebiegu procesu rozdziału dla koncentratów grawitacyjnych z innych zakładów i złóż Dolnego Śląska.

Dolny Śląsk stanowi największą bazę surowcową surowców okruchowych w Polsce. Stąd pochodzi największa ilość wytwarzanych w kraju kruszyw budowlanych, żwirów, żwirków oraz piasków przeznaczonych dla celów

szklarskich, formierskich, budowlanych, filtracyjnych itp.

W trakcie operacji eksploatacji i przeróbki tych surowców powstają odpady drobnoziarniste, które są składowane w pobliżu zakładów eksploatujących złoża. W zakładach, w których oczyszczanie i klasyfikacja żwirów prowadzona jest na mokro, powstają odpady które są wzbogacone w minerały ciężkie. Z odpadów tych, jak to wykazano w niniejszym opracowaniu na przykładzie zakładu w Proszkowicach, można wydzielić bogate koncentraty grawitacyjne.

Jest rzeczą ewidentną iż produktem końcowym technologii muszą być produkty handlowe, czyli koncentraty monomineralne otrzymane w wyniku rozdziału koncentratów grawitacyjnych. Ekonomia takiego przedsięwzięcia jak wskazują doświadczenia krajów gdzie takie surowce są eksploatowane oraz doświadczenia autorów niniejszego artykułu, zależy od ilości otrzymanych produktów a zatem od zasobów składników użytecznych. W naszym przypadku dla zapewnienia opłacalności koniecznym jest wzięcie pod uwagę ilości minerałów powstających w conajmniej 11-tu wybranych zakładach z opisanych w tablicy 1, lub także ilości zeskiadowanych w stawach osadowych. Otrzymywane w poszczególnych zakładach koncentraty grawitacyjne winne być przerabiane na koncentraty handlowe ilmenitu, cyrkonu, rutylu i monacytu zbiorczo po uśrednieniu.

Schemat ogólny zakładu produkującego koncentraty handlowe przedstawiono na rys. 8. Koncentraty grawitacyjne otrzymywane w poszczególnych zakładach byłyby koncentratami wstępnymi zawierającymi 20 - 30 % minerałów ciężkich które łatwo otrzymać tanim i prostym sposobem na separatorach strumieniowo zwojowych. Natomiast w centralnym zakładzie następowałoby doczyszczanie koncentratów wstępnych na stołach koncentracyjnych lub spiralach do zawartości 95-98 % minerałów ciężkich i przeprowadzany byłby rozdział na produkty handlowe.

Powstające w trakcie wzbogacania grawitacyjnego odpady stanowiłyby odmyty i klasyfikowany piasek drobnoziarnisty, którego realne wykorzystanie znacznie mogłoby poprawić ekonomikę całego zaprezentowanego i zaproponowanego tu przedsięwzięcia.

7. Literatura

- Akerman K., Krajewski J. (1958) Studia nad selektywnym wzbogacaniem bałtyckich piasków cyrkonowo - ilmenitowych cz. I. Przemysł Chem. 37, 343 - 349.
- Bałchanowski S., Rydzewski M. (1987) Projekt prac badawczych dla oceny występowania i wykorzystania minerałów ciężkich w eksploatowanych złożach kruszywa naturalnego na Dolnym Śląsku. Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu 1987. (dla CPBP 03.08.).

- Baichanowski S., Rydzewski M. (1988) Sprawozdanie z prac badawczych dla oceny występowania i wykorzystania minerałów ciężkich w eksploatowanych złożach kruszywa naturalnego na Dolnym Śląsku, Raporty CPBP 03.08. Zadanie IV.1 8., czerwiec 1988 i listopad 1988.
- Biernat J., Głowacz K., Łoziński J., Pilch W., Stachurski J., (1983) Aktualne problemy wzbogacania krajowych piasków morskich. Zesz. Nauk. AGH, Z. 8, Nr 43, 147-186.
- Buksiński S., Cegła J. (1979), Kruszywa naturalne, w M.: "Surowce Mineralne Dolnego Śląska". Praca zbiorowa pod red. K. Dziedzica., Ossolineum 1979., Wrocław, 411 - 422.
- Centralny Urząd Geologii, (1986), Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce (w.g. stanu na 31. XII. 1985) Wyd. Geol., Warszawa.
- Domaszewska T. (1984), Występowanie i eksploatacja złota na Dolnym Śląsku, Przegląd Geol. Nr. 4.
- Gomes I. M. et. al. (1979), Recovering by-product heavy minerals from sand and gravel, placer gold and industrial mineral operations. US Dep. of the Interior, Bureau of Mines, Report of Investigation No 8366.
- Gomes I. M. et. al. (1980), Recovery of by-product heavy minerals from sand and gravel operations in Central and Southern California. US Dept of the Interior, Bureau of Mines, Report of Investigation No 8471.
- Grodzicki A. (1972), Petrografia i mineralogia piasków złotonocnych Dolnego Śląska, Geologia Sudetica, vol. 6, Warszawa., 233-291
- Hedrick J. B. (1986) Rare Earth, Minerals and Metals. US Bureau of Mines Minerals Yearbook, 1 - 12 (preprint).
- Jęczmyk M. (1979), Minerale ciężkie w aluwialach potoków na obszarze metamorfiku izerskiego., Biuletyn Inst. Geol. Nr. 319, 73-149.
- Jęczmyk M., Kanasiewicz J. (1970), Minerale ciężkie w aluwialach górnej Kwisy., Kwart., Geol. t. 14, Nr. 1., 182-188.
- Kanasiewicz J., Baichanowski S., Borucki J., Jęczmyk M., Stachowiak A., (1985), Program badań geochemicznych i szlichowych w Sudetach i na bloku przedsudeckim., Archiwum Państwowego Instytutu Geologicznego Warszawa.
- Kluczeńska B., (1988), Ocena przydatności piasku odpadowego (-0.5mm) do stosowania w budownictwie. Praca I-11 /72-z/88, Instytut Górnictwa, Politechnika Wrocławska.
- Łuszczkiewicz A., (1983), Próby wydzielania koncentratów ilmenitu i cyrkonu z piasków morskich południowego Bałtyku., Fizykochem. Probl. Mineralurgii 15, 55-63.
- Łuszczkiewicz A. (1987), Odzysk minerałów ciężkich z piasków szklarskich kopalni "Osiecznica". Fizykochem. Probl. Mineralurgii, 19, 309-319.
- Łuszczkiewicz A. (1988), Odpady z płukania żwirów, jako znaczące źródło minerałów ciężkich., Mat. Sympozjum "Optymaliz. Wykorzyst. Surowców Miner. w Proc. Przeróbki i Przetwórstwa", PAN-AGH, Kraków, 154-165.
- Łuszczkiewicz A., Pędziwol A., Świderski J., Wierzbicki Z. (1988), Opracowanie technologii odzysku minerałów ciężkich i monacytu ze złóż Dolnego Śląska Raport I-11/S-30/88, Politechnika Wrocławska

C. P. B. P. 03. 08.

- Łuszczkiewicz A. (1989), Opracowanie technologii odzysku minerałów ciężkich ze złóż okruchowych. Uruchomienie politechnicznej linii odzysku w Proszkowicach., Raport I-11/S-79/1989, listopad, Inst. Górnictwa Politechnika Wrocławska.
- Polkin S.I. (1967), Obogaczenie rud i rossypel redkich metallov., Izd. Nedra, Moskva.
- Polkin S.I. (1987), Obogaczenie rud i rossypel redkich i blagorodnych metallov, Izd. Nedra, Moskva.
- Siliwonzuk Z. (1974), Geologiczno surowcowe problemy kruszywa naturalnego w Polsce, Kwart. Geol., t. 18, Nr. 4, 813-827.
- Steinhöf J., Kurzyca M. (1985), Wzbogacanie piasków morskich zalegających rejon ławicy Odrzańskiej, Mat. Konf.: IV Gliwickie Sympozjum Teorii i Praktyki Procesów Przerobczych, Gliwice 1985.
- Świderski J., Łuszczkiewicz A. (1984), Rozpoznanie koncentracji minerałów ciężkich w piaskach lądowych, Raport Nr: I-11/S-33/84, Inst. Górnictwa, Politechnika Wrocławska.
- Zmudziński K., Konaszyńska-Zmudzińska Z., Pędziwoł A., Antman A., Żytkowiak T. (1988), Ocena techniczno-ekonomiczna otrzymywania koncentratów minerałów ciężkich z piasków Dolnego Śląska. Polskie Tow. Ekonomiczne, Zakład Ekspertyz Gospodarczych PETEX Wrocław.

ABSTRACT

Łuszczkiewicz A., Mazanek Cz. (1990), Recovering of heavy minerals from Fore-Sudetic alluvial deposits., Physicochemical Problems of Mineral Processing, 23, 41-58 (polish text)

The history of exploration and recovering of heavy minerals from Lower Silesian alluvial assemblages has been described. Lower Silesia has major domestic reserves of sand and gravel which are mainly derived from the weathering of the mineralized areas in the Sudety Mountains. Total reserves of heavy minerals and evaluation of possibility of their recovering are discussed. The results of semi-industrial and industrial gravity concentration experiments of sands from one of the Lower Silesia gravel plant are presented. Concentrates obtained in these experiments were subsequently separated by magnetic and high tension methods on industrial scale devices and the results are discussed.