

PRZERÓBKA ODPADÓW GÓRNICZO-HUTNICZYCH PRZY POMOCY TECHNIKI MIKROFALOWEJ

MINING AND SMELTING WASTE PROCESSING USING MICROWAVE TECHNOLOGY

Antoni Muszer - Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski
Tomasz Cioska - Plazmatronika NT Sp. z o.o. we Wrocławiu

W ramach prac naukowo-badawczych, związanych z wykorzystaniem surowców odpadowych z przemysłu wydobywczego i hutniczego, wykonano prace laboratoryjne z wykorzystaniem działła mikrofalowego (rys. 1), co w przeciwieństwie do procesów pirometalurgicznych zachodzących w piecach hutniczych, pozwala na radykalne skrócenie czasu przetwarzania skał i minerałów w produkty, które mogą być wykorzystane w budownictwie [1], szklarstwie [2], obronności, w przemyśle tekstylnym, drogownictwie i wielu innych działach gospodarki [3].

W trakcie trwających eksperymentów, przetestowano różne materiały i skały odpadowe pod kątem szybkości procesu topienia się i sprawności instalacji eksperymentalnej. Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano w przypadku odpadów bazaltowych i żużla pomiedziowego z pieca szybowego. Oba użyte materiały charakteryzują się podobnym składem głównych składników tlenkowych. W wyniku oddziaływania mikrofal materiały odpadowe topiły się w czasie od 5 do 20 minut, w zależności od techniki topienia materiału (rys. 3). Po stopieniu materiału podjęto próbę wykonania włókna ze stopionego bazaltu i żużla szybowego.

W wyniku oddziaływania mikrofal na substancje stałe, odpadowe, uzyskano w bardzo krótkim czasie nie tylko stop, ale jednocześnie uzyskano skondycjonowane szkliwo mineralne, które może być kształtowane według potrzeb końcowego produktu. Otrzymane włókna miały od 10 μm do 2 mm grubości, a ich jakość i grubość zależała tylko od prędkości mechanizmu wyciągającego stop z pieca mikrofalowego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów badawczych wskazują, że istnieje ogromny zakres i potencjał zastosowań urządzeń mikrofalowych do zagospodarowywania odpadów i przetwarzania surowców skalnych.

Słowa kluczowe: mikrofale, topienie skał, topienie żużli, włókna mineralne, tekstylia mineralne

As part of scientific and research work related to the use of waste materials from the mining and smelting industries, laboratory work was carried out using microwave "gun" (figure 1). The process, in contrast to the pyrometallurgical processes taking place in metallurgical furnaces, allows for radical reduction of the processing time of rocks and minerals into products that can be used in construction [1], glass [2], defense, textile, road and many other sectors of economy [3].

During the experiments, various materials and waste rocks were tested with respect to the speed of the melting process and the efficiency of the experimental installation. The most promising results were obtained in the case of basalt waste and copper slag from the shaft furnace. Both materials are characterized by similar composition of main oxide components. As the result of the influence of microwaves, waste materials melted in a period of 5 to 20 minutes, depending on the material and melting technique (fig. 3). After melting the material, an attempt was made to draw fibers from both molten basalt and shaft slag.

As a result of the influence of microwaves on solid and waste substances, not only the melt was obtained in a very short time, but at the same time the conditioned mineral glass was obtained, which can be shaped according to the requirements of the final product. The fibers obtained were from 10 μm to 2 mm thick, and their quality and thickness depended only on the speed of the drawing mechanism extracting the melt from the microwave chamber. The results of experiments indicate that there is a huge range and potential of microwave equipment applications for waste management and processing of rock raw materials.

Keywords: microwaves, melting rocks, melting slags, mineral fibers, mineral textiles

WSTĘP

W ramach prac naukowo-badawczych (granty ING/S), związanych z wykorzystaniem surowców odpadowych z przemysłu wydobywczego i hutniczego, wykonano prace laboratoryjne z wykorzystaniem działła mikrofalowego (rys. 1). Mikrofale, w przeciwieństwie do procesów pirometalurgicznych

zachodzących w piecach hutniczych, pozwalają na radykalne skrócenie czasu przetwarzania skał i minerałów [1, 2, 3, 4] w produkty, które mogą być wykorzystane w budownictwie [5], szklarstwie [6], górnictwie obronności, w przemyśle tekstylnym, drogownictwie, w przemyśle kosmicznym [7] i wielu innych działach gospodarki społecznej [8].

Odpady z przemysłu wydobywczego i hutniczego można

bez problemu zaliczyć do złóż antropogenicznych w myśl definicji, że jest to nagromadzenie kopaliny użytecznej, utworzonej przez człowieka w rezultacie zbierania odpadów kopalnianych, przerobowych, technologicznych i innych w czasie, gdy nieznany był sposób ich wykorzystania. Uznanie tego nagromadzenia za złożę następuje w chwili przystąpienia do jego wybierania (eksploatacji) [9]. Tak więc ich zagospodarowanie będzie zgodne z obecną Polityką Surowcową Państwa. W Polsce większość odpadów przemysłowych w ilości 79% jest zagospodarowywana, a jedynie od 13 do 16% jest składowanych lub magazynowanych. To właśnie tę część odpadów można byłoby przetworzyć na produkty budowlane, obronne lub tekstylne.

Skały w 90% składają się z krzemionki i związków zwanych krzemianami (amfibole, pirokseny, oliwiny, itp.). Większość odpadów przemysłowych również składa się z krzemianów i innych minerałów występujących tylko w tych utworach (krystaliczne formy krzemionki, korund, magnetyt, spinele, melilit, i inne) jaki i w przyrodzie (forsteryt, fajalit, wollastonit, diopsyd, skalenie). Wszystkie substancje mineralne, jak i bezpostaciowe formy substancji znajdujące się w odpadach przemysłowych podlegają takim samym procesom



Rys. 1. Działo mikrofalowe wraz z komorą mikrofalową użyte w doświadczeniach

Fig. 1. A microwave gan with a microwave chamber used in experiments

fizykochemicznym jak skały i minerały. Można to wykorzystać do wygenerowania z nich produktów, które będą miały inne właściwości niż materiał wyjściowy. Celem niniejszych badań było stworzenie włókna z wybranych odpadów przemysłowych oraz wstępne określenie jego parametrów technicznych.

MATERIAŁ, METODYKA I APARATURA

W trakcie trwających eksperymentów przy użyciu działła mikrofalowego, przetestowano różne materiały i skały odpadowe pod kątem szybkości procesu topienia się i sprawności instalacji eksperymentalnej. Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano w przypadku odpadów bazaltowych i żużla pomiedziowego z pieca szybowego. Do badań została użyta, zgodnie z konwencją, długość fali 2,45 Gz (rys. 2) oraz działło mikrofalowe o mocy 3 kW (rys. 1). Moc użytą do badań uzyskano poprzez specjalnie skonstruowany zasilacz. Działło mikrofalowe oraz urządzenia towarzyszące zostały użyte przez firmę Plazmatronika NT sp. z o.o. z Wrocławia. Przed poddaniem próbek działaniu mikrofal, materiał badawczy został zmielony do frakcji > 5 mm.

Odpady bazaltowe użyte do doświadczeń pochodziły z obszaru Dolnego Śląska. Należą one do odmian typu bazaltów oliwinowych i bazanitów nefelinowych. Charakteryzują się łatwością topienia i niską lepkością odlewniczą. Bazalty na powierzchniach zwietrzałych mają barwę szarą z odcieniem zielonym, po rozbiciu zaś są ciemnoszare. Charakteryzują się strukturą drobnoziarnistą do afanitowej, rzadziej porfirowatą. Występują w nich kryształy oliwinów (zielonkawe) i piroksenów (czarne). Istotnymi składnikami w mniejszej ilości są nefelin i plagioklaz. Zawartość SiO_2 waha się od 39,4 do 44,80%, MgO od 10,12 do 12,84%, Al_2O_3 od 11,82 do 13,78%, Fe_2O_3 4,12 do 5,10%, MnO od 0,2 do 0,25% oraz TiO_2 od 1,37 do 2,48%.

Próbki hutnicze użyte do badań pochodziły ze zgromadzonych zapasów żużla szybowego pochodzących z KGHM-u. Pomiedziowy żużel metalurgiczny pod względem składu mineralnego oraz struktury jest petrograficznym analogiem skał magmowych występujących w skorupie ziemskiej [10, 11]. Żużel pomiedziowy z pieca szybowego, użyty do badań jest bardzo niejednorodny pod względem struktury i tekstury oraz składu mineralnego. Wykazuje on miejscami teksturę zwartą, gęsto upakowaną, przechodzącą w drobno- i gruboporowatą o porach okrągłych, owalnych i nieforemnych. W badanych próbkach dominuje struktura drobnoziarnisto-igielkowa, hipokrystaliczna od jawnokrystalicznej (fanerokrystaliczna) do afanitowej [12]. Dominującą strukturą ze względu na stopień prawidłowości wykształcenia ziarn jest struktura ksenomorficzno-hipautomorficzna. Pod mikroskopem widoczne są kryształy igielkowe, szkieletowe i dendrytyczne z szeregu izomorficznego diopsyd-akmit oraz diopsyd-hedenbergit. Igiełki i dendryty klinopiroksenitów sklejone są intersertalną fazą szklistą. Skład chemiczny omawianych żużli pomiedziowych wskazuje na dominację SiO_2 (zawartość 41,8%), ponadto występują: CaO (20,52%), MgO (2,32%), Al_2O_3 (6,8%), Fe_2O_3 (17,11%) oraz pierwiastki: Cu (0,51%), Pb (0,24%), Zn (0,53%), Mn (0,19%), Cr (510 ppm), Ni (89 ppm), Cd (5 ppm), Co (770 ppm, [13]). Oba użyte materiały charakteryzują się podobnym składem głównych składników tlenkowych.

Materiał badawczy został poddany działaniom mikrofal w komorze mikrofalowej (rys. 1). W wyniku oddziaływania mikrofal materiały odpadowe topiły się w czasie od 5 do 20 minut, w zależności od techniki topienia materiału (rys. 3). Szybkość topienia minerałów zawartych w próbkach uwarunkowana była

Pasma	Zakres częstotliwości [GHz]	Pasma	Zakres częstotliwości [GHz]
UHF	0.3 - 1.12	Ka	26.5 - 40.0
L	1.12 - 1.7	Q	33.0 - 50.0
LS	1.7 - 2.6	U	40.0 - 60.0
S	2.6 - 3.95	M	50.0 - 75.0
C	3.95 - 5.85	E	60.0 - 90.0
XC	5.85 - 8.2	F	90.0 - 140.0
X	8.2 - 12.4	G	140.0 - 220.0
Ku	12.4 - 18.0	H	220.0 - 325.0
K	18 - 26.5		

Rys. 2. Zakres częstotliwości mikrofal
Fig. 2. The range of microwave frequencies

ilością użytego materiału. W trakcie eksperymentu topiono materiał w ilościach różnych, w zależności od przyjętych parametrów próbki ważyły od 2 do 10 kg. Po stopieniu materiału podjęto próbę wykonania włókna ze stopionego bazaltu i żużła szybowego oraz kształtek budowlanych. Wstępne, pozytywne wyniki prac dotyczących włókien mineralnych zostaną zamieszczone poniżej, natomiast wstępne wyniki tworzenia kształtek materiałów budowlanych zostaną opisane w innym artykule.

Badania mikroskopowe próbek odpadów przemysłowych oraz włókien mineralnych wykonano w Pracowni Analiz Surowców Mineralnych w Instytucie Nauk Geologicznych UWr. Obserwacje próbek przeprowadzono w świetle odbitym i przechodzącym przy użyciu mikroskopu Optiphot 2-Pol firmy Nikon. Do określenia składu pierwiastkowego oraz homogeniczności włókien zastosowano mikroskop skaningowy. Badania te wykonano za pomocą systemu Qemscan w WCB-EITplus we Wrocławiu.

WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone badania wykazały, że materiały użyte w doświadczeniach nie we wszystkich przypadkach pochłaniały mikrofalę. Tylko wybrane odpady bazaltowe i skruszone bazalty ulegały stopieniu. Ich skład jest zbliżony do skał znajdujących się na księżycu [3]. W przypadku żużli hutniczych pomiedziowych we wszystkich przypadkach eksperymentów uzyskano efekt

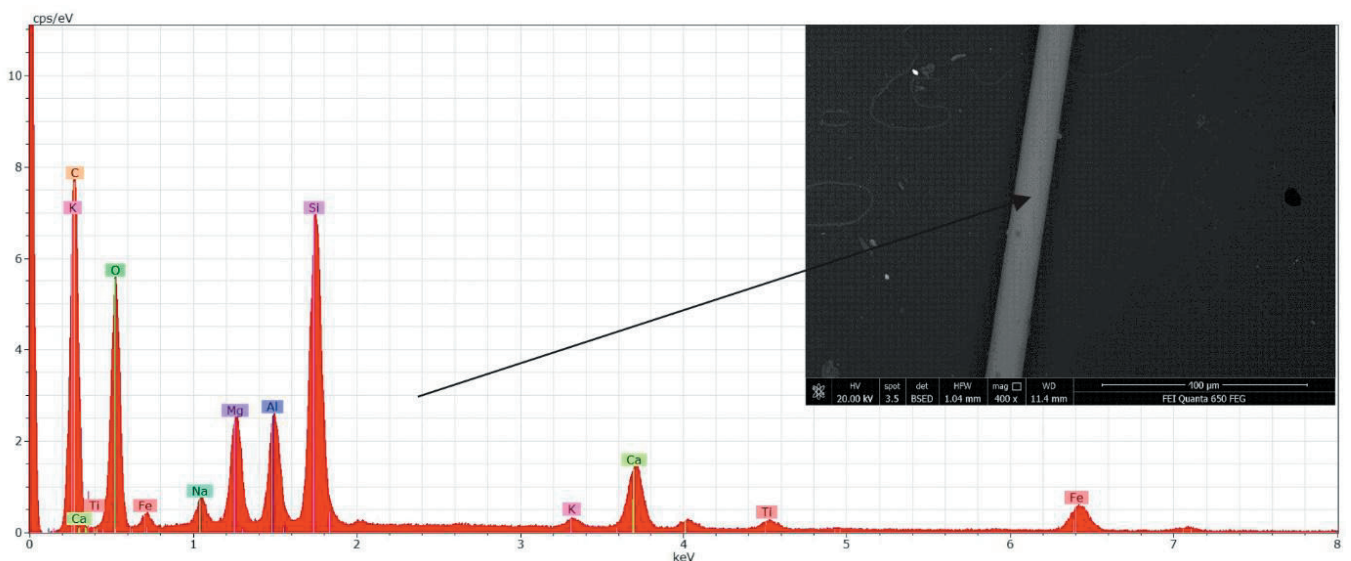


Rys. 3. Stop powstały z odpadów widoczny w oknie pieca mikrofalowego
Fig. 3. Stop made of waste visible in the window of the microwave oven

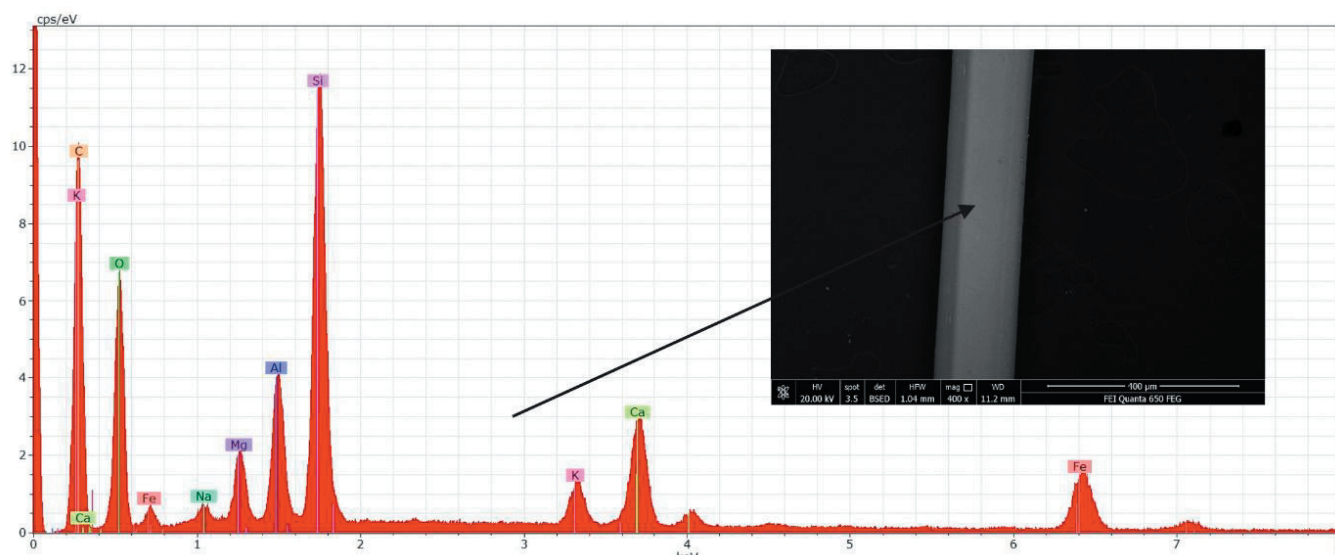
pozytywny, czyli stopienie materiału.

Materiał po stopieniu wylewano do kształtek lub próbowano wyciągnąć z niego nić o jak najlepszych parametrach technicznych. Problem wykonywania odlewów nie będzie omawiany w niniejszym artykule. Nić bazaltową oraz nić żużlową, które otrzymano podczas ciągnięcia, poddano badaniom w mikroobszarze w celu stwierdzenia homogeniczności materiału oraz możliwości technicznych związanych z grubością i potencjalnymi zmianami jej grubości na odcinkach metrowych.

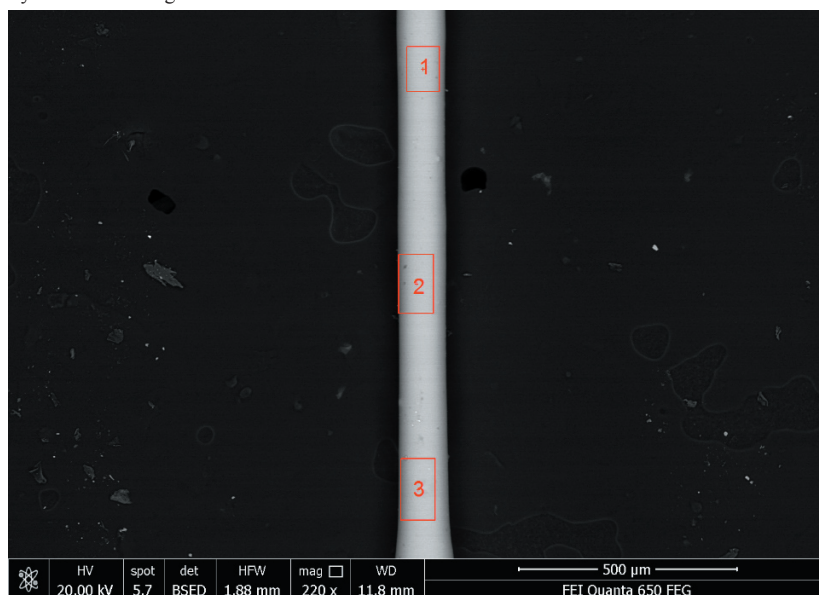
Wyniki pomiarów pod mikroskopem optycznym, jak i w mikroskopie skaningowym są nad wyraz zadowalające. Uzyskano bardzo pozytywne rezultaty dotyczące możliwości wytwarzania włókien mineralnych z bazaltów, odpadów bazaltowych i żużli pomiedziowych z pieca szybowego za pomocą działła mikrofalowego. W wyniku oddziaływania mikrofal na substancje stałe, odpadowe, uzyskano w bardzo krótkim czasie nie tylko stop, ale jednocześnie uzyskano skondycjonowane szkliwo mineralne, które może być kształtowane według potrzeb końcowego produktu. Za pomocą skonstruowanego mechanizmu do ciągnięcia leizny skalnej otrzymano w obu przypadkach te same rezultaty. Otrzymane włókna miały od 10 μm do 2 mm grubości a ich jakość i grubość zależała tylko od prędkości mechanizmu wyciągającego



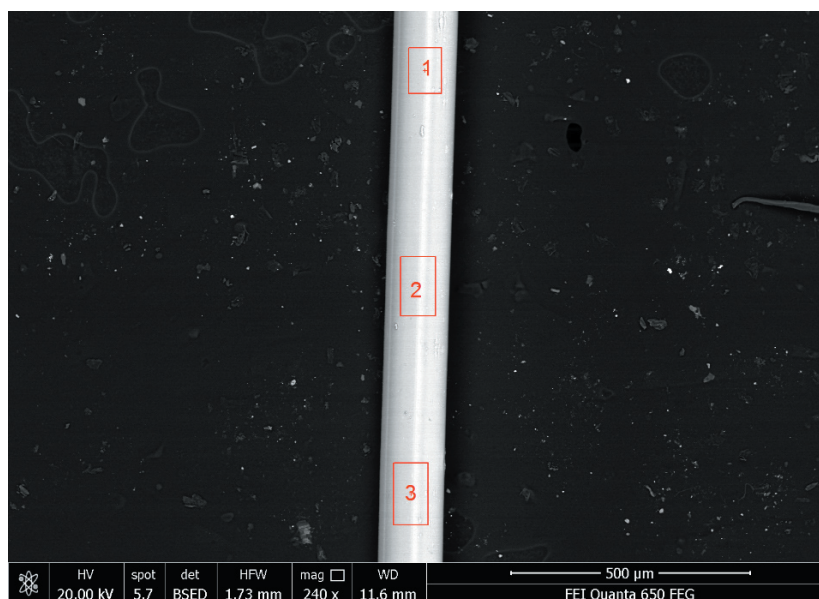
Rys. 4. Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego włókna bazaltowego
Fig. 4. Spectrum of typical X-ray radiation of basalt fiber



Rys. 5. Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego włókna żuźlowego
 Fig. 5. Spectrum of typical X-ray radiation of slag fiber



Rys. 6. Włókno bazaltowe z zaznaczonymi miejscami analiz powierzchniowych EDS
 Fig. 6. Basalt fiber with marked EDS surface analyzes



Rys. 7. Włókno żuźlowe z zaznaczonymi miejscami analiz powierzchniowych EDS.
 Fig. 7. Slag fiber with marked EDS surface analyzes.

stop z pieca mikrofalowego. Cieńsze włókna były niewidoczne gołym okiem, co stwarzało problemy techniczne podczas wyciągania. Włókna bazaltowe, w przeciwieństwie do włókien żuźlowych (rys. 4, 5), charakteryzowały się większą lepkością i szybszym procesem stygnięcia od włókien żuźlowych.

Z obydwu włókien można było wykonać splot w zależności od grubości nici oraz pręty zbrojeniowe. Im cieńsza nić, tym proces ten jest technicznie prostszy. Obydwa nici charakteryzują się dużą giętkością i sprężystością oraz stałym składem pierwiast-

Tab. 1. Tabela analizy włókna bazaltowego w punkcie 1 na rys. 6

Tab. 1. Basalt fiber analysis table at point 1 in Fig. 6

B_EDS_1

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	23.01	46.01	62.84	2.69
Na	11	K-series	1.37	2.73	2.60	0.12
Mg	12	K-series	3.80	7.61	6.84	0.24
Al	13	K-series	3.35	6.69	5.42	0.19
Si	14	K-series	8.35	16.70	12.99	0.38
K	19	K-series	0.27	0.53	0.30	0.03
Ca	20	K-series	3.91	7.82	4.26	0.14
Ti	22	K-series	0.66	1.33	0.61	0.05
Fe	26	K-series	5.29	10.58	4.14	0.17
Total:			50.00	100.00	100.00	

Tab. 2. Tabela analizy włókna bazaltowego w punkcie 2 na rys. 6

Tab. 2. Basalt fiber analysis table at point 2 in Fig. 6

B_EDS_2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	21.53	45.53	62.48	2.50
Na	11	K-series	1.29	2.73	2.61	0.11
Mg	12	K-series	3.55	7.50	6.77	0.22
Al	13	K-series	3.14	6.63	5.40	0.18
Si	14	K-series	7.98	16.88	13.20	0.37
K	19	K-series	0.24	0.50	0.28	0.03
Ca	20	K-series	3.75	7.93	4.34	0.14
Ti	22	K-series	0.62	1.32	0.60	0.04
Fe	26	K-series	5.19	10.97	4.31	0.17
Total:			47.30	100.00	100.00	

Tab. 3. Tabela analizy włókna bazaltowego w punkcie 3 na rys. 6

Tab. 3. Basalt fiber analysis table at point 3 in Fig. 6

B_EDS_3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	23.91	45.01	62.14	2.93
Na	11	K-series	1.43	2.70	2.59	0.12
Mg	12	K-series	3.93	7.41	6.73	0.24
Al	13	K-series	3.51	6.62	5.42	0.20
Si	14	K-series	8.87	16.70	13.13	0.41
K	19	K-series	0.32	0.60	0.34	0.04
Ca	20	K-series	4.27	8.03	4.43	0.15
Ti	22	K-series	0.79	1.49	0.69	0.05
Fe	26	K-series	6.09	11.47	4.54	0.20
Total:			53.13	100.00	100.00	

Tab. 4. Tabela analizy włókna żuźlowego w punkcie 1 na rys. 7

Tab. 4. Slag fiber analysis table at point 1 in Fig. 7

Z_EDS1

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	19.75	45.19	64.11	2.33
Na	11	K-series	0.65	1.48	1.47	0.07
Mg	12	K-series	1.51	3.45	3.22	0.11
Al	13	K-series	2.77	6.34	5.33	0.16
Si	14	K-series	6.87	15.71	12.70	0.32
K	19	K-series	0.99	2.27	1.32	0.06
Ca	20	K-series	4.02	9.19	5.20	0.14
Ti	22	K-series	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	26	K-series	7.15	16.36	6.65	0.22
Total:			43.71	100.00	100.00	

kowym wzdłuż długości (rys. 6, 7; tab. 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Proces stapiania skały odpadu bazaltowego lub żuźła pomiedziowego w przypadku zastosowanej technologii jest jednoczesnym procesem kondycjonowania, niezbędnym do osiągnięcia włókien o identycznej grubości i parametrach zawartości składników chemicznych. Powyższe analizy chemiczne w mikroobszarze potwierdziły możliwości techniczne skrócenia czasu topienia skał przy jednoczesnym zachowaniu jednolitego, homogenicznego składu wyjściowego produktu. Jednocześnie obecne w żuźlu pomiedziowym zanieczyszczenia metalami ciężkimi zostały skutecznie rozpuszczone w utworzonym stopie. Przeprowadzone analizy punktowe włókna pomiedziowego nie wykazały obecności tych zanieczyszczeń.

Podsumowanie

Włókna i nici mineralne oraz produkty wytwarzane na ich podstawie są bardzo poszukiwane na rynku światowym. W większości przypadków produkowane są standardowo poprzez przetopienie bazaltów do stanu leizny skalnej a następnie wyciągania z niej nici. Z uwagi na właściwości i szeroki zakres stosowania nici bazaltowych i podobnych produktów, zapotrzebowanie na ciągłą nić wynosi setki tysięcy ton rocznie. Obecnie producenci zabezpieczają potrzeby rynku zaledwie w wysokości 1-2%. Z produktów hutniczych dotychczas nikt nie wytwarza nici mineralnych, a te które uzyskano w opisywanych eksperymentach, mają unikatowe własności, gdyż mogą mieć zastosowanie wojskowe. Nici bazaltowe lub żuźlowe mogą zastąpić szkło, azbest, metal, drewno w wielu produktach i półproduktach stosowanych w codziennym użyciu lub w technikach specjalnych.

Proces przetopienia bazaltu lub żuźła w konwencjonalny sposób wymaga minimum temperatury 1400°C i bardzo długiego czasu. Badania efektywności grzania mikrofalowego potwierdziły nawet 89% poprawę skuteczności grzania mikrofalowego

Tab. 5. Tabela analizy włókna żuźlowego w punkcie 2 na rys. 7

Tab. 5. Slag fiber analysis table at point 2 in Fig. 7

Z_EDS2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	22.94	44.99	63.49	2.70
Na	11	K-series	0.87	1.70	1.67	0.08
Mg	12	K-series	1.86	3.66	3.40	0.13
Al	13	K-series	3.45	6.77	5.66	0.19
Si	14	K-series	8.44	16.54	13.30	0.39
K	19	K-series	1.20	2.35	1.36	0.06
Ca	20	K-series	4.54	8.90	5.02	0.16
Ti	22	K-series	0.04	0.07	0.03	0.03
Fe	26	K-series	7.66	15.02	6.07	0.23
Total:			51.00	100.00	100.00	

Tab. 6. Tabela analizy włókna żuźlowego w punkcie 3 na rys. 7

Tab. 6. Slag fiber analysis table at point 3 in Fig. 7

Z_EDS3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
O	8	K-series	22.71	44.18	62.96	2.71
Na	11	K-series	0.81	1.58	1.56	0.08
Mg	12	K-series	1.86	3.62	3.39	0.13
Al	13	K-series	3.42	6.66	5.63	0.19
Si	14	K-series	8.41	16.36	13.28	0.38
K	19	K-series	1.24	2.41	1.40	0.06
Ca	20	K-series	4.74	9.22	5.24	0.17
Ti	22	K-series	0.06	0.12	0.06	0.03
Fe	26	K-series	8.15	15.85	6.47	0.25
Total:			51.40	100.00	100.00	

w porównaniu z grzaniem konwencjonalnym w przypadku niektórych materiałów skalnych, oraz obniżenie temperatury topienia nawet o 1000°C. Testowana technologia może skrócić czas topienia skał do kilkunastu minut, a potrzebna nić, ze względu na małe gabaryty urządzenia mikrofalowego, może być wytwarzana w bardzo małych pomieszczeniach lub halach przemysłowych. Włókno bazaltowe pod względem składu chemicznego i właściwości odróżnia się od wszystkich innych włókien mineralnych. Posiada unikalne właściwości fizykochemiczne, dużą wytrzymałość porównywalną z kevlarom i wysoką oporność termiczną.

Analizowane włókna powstałe ze stopienia pomiedziowego żużla szybowego nie odbiegają zasadniczo od właściwości włókien bazaltowych, a w kilku cechach je przewyższają.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów badawczych wskazują, że istnieje ogromny zakres i potencjał zastosowań urządzeń mikrofalowych do zagospodarowywania odpadów i przetwarzania surowców skalnych. Celowe jest zidentyfikowanie tych substancji w toku prac laboratoryjnych na specjalnie wykonanych urządzeniach i przejście ze skali laboratoryjnej do skali półtechnicznej i przemysłowej.

Literatura

- [1] Jiří Militký, Martin Černý, Petr Jakeš, Vladimír Kovačič, Zbyněk Sucharda, Petr Glogar, 2008, *Composite materials with basalt fibre reinforcement and pyrolysed polysiloxane matrix*. Acta Research Reports, No.17, 31–36
- [2] Hartlieb P., Toifl M., Kuchar F., Meisels R., Antretter T., *Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution*. Minerals Engineering 9, 34-41
- [3] Kahraman S., Saygin E., Balci C., Sarbangholi F.S., Karpuz C., 2018, *Microwave-assisted hard rock excavation*. TunnelTECH. 5/7/2018, 1-6
- [4] Jerby E, Meir Y, Faran M., *Basalt Melting by Localized-Microwave Thermal-Runaway Instability*. 14th International Conference on Microwave and High Frequency Heating, AMPERE-2013. 255-258
- [5] Karwowska J., Łapko A., 2011, *Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych*. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. Vol. 2, no. 1. s. 41-46
- [6] Kogut K., Kasprzyk K., Zboromirska-Wnukiewicz B., Ruziewicz T., 2016, *The research of ceramic materials for applications in the glass industry including microwave heating techniques*. IOP Conf.Series:MaterialsScienceandEngineering. p. 1-8
- [7] Taylor L.A., Meek T., 2005, *Microwave Sintering of Lunar Soil: Properties, Theory, and Practice*. Journal of Aerospace Engineering. V. 18. 3. 188-196
- [8] Walkiewicz J.W., Raddatz A.E., McGil S.L., 1991, *Microwave-assisted grinding*. IEEE Transactions on Industry Applications. v 27, Issue: 2, p. 239 – 243
- [9] Nieć M. , 1999 - Przegląd Geologiczny, vol. 47, nr 1, 1999, s. 93-98
- [10] Bielankin et al. 1957, *Petrografia kamieni sztucznych*. Warszawa. Wyd. Geol.
- [11] Szymański A., 1989, *Technical mineralogy and petrography*. Parts A and B. Warszawa, Elsevier
- [12] Muszer Antoni (1996): *Charakterystyka petrograficzno-mineralogiczna żużli metalurgicznych z huty miedzi Głogów*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 30, s 193-205
- [13] Muszer A. (1998): *Metale ciężkie w żużlach szybowych z Huty Miedzi „Głogów”*. Wybrane zagadnienia z zakresu ochrony litosfery. Wrocław. 48-55



Kopalnia Biała Góra