

Rynek tantalu na poczatku XXI wieku

Mariusz Krzak¹, Andrzej Gałaś², Katarzyna Król¹



M. Krzak



A. Gałaś



K. Król

Tantalum market at the beginning of the 21st century. Prz. Geol., 69: 234–243; doi: 10.7306/2021.13

A b s t r a c t. Tantalum, despite the low consumption level, is one of the strategically important metals for the world economy. In terms of the world production volume, it places oneself on a distant position; however, its price was one of the highest at the beginning of the 21st century. Tantalum is a transition metal with a high melting point and high chemical resistance, which determines the spectrum of its applications. It is used mainly in the capacitors production, sputtering and as an additive for superalloys. The 21st century is a period of noticeable changes in the structure of quantitative supplies, consumption centres and price fluctuation. There are numerous

but small centres of primary production (artisanal mines) in Africa. Sources of tantalum raw-materials (mineral deposits and its reserves), basic factors determining the economic situation on the market, substitution possibilities and the prices evolution are presented and assessed in the paper. Marginal significance of the economy of tantalum raw materials for Poland is mentioned.

Keywords: tantalum market, primary and secondary production, consumption, prices, trade, substitution

Tantal (Ta) to metal należący do grupy wanadowców (V, Nb, Ta). Został wydzielony i opisany w 1802 r. przez szwedzkiego chemika Andersa Gustafa Ekeberga (jakkolwiek wyizolowany metal zawierał znaczną domieszkę niobu). Przemysłową produkcję rozpoczęto zaś w latach 20. XX w., po upowszechnieniu metod rozdzielania niobu i tantalu. Nazwa metalu pochodzi od postaci z greckiej mitologii – Tantalosa. Najważniejszym minerałem i pierwotnym źródłem tantalu jest tantalit (Fe, Mn)Ta₂O₆. W połowie lat 30. XX w. przemysł stalowniczy wykorzystywał rocznie 20–30 t koncentratów tantalu (Bolewski, 1994). Jednym ze złóż najwcześniej zagospodarowanych w celu pozyskania tego metalu jest złożo pegmatytów Greenbushes w Australii, eksploatowane od 1888 r. W 1970 r. światowa produkcja tantalu nieznacznie przekraczała 550 t koncentratu, osiągając maksimum rzędu 700 t na przełomie lat 70 i 80 XX w.

Nierówny poziom produkcji tantalu w II połowie XX w. był powodowany kilkoma czynnikami: małymi zasobami odkrytych złóż, zmienną jakością rud, atrakcyjnością (rozwoj nowych technologii) i dostępnością gospodarczą surowca. Liderzy światowej produkcji zmieniali się z biegiem lat. W latach 70. XX w. prym wiodły Kanada i kraje byłego Związku Socjalistycznych Republik Radzieckich (ZSRR), w latach 80. XX w. dołączyła Australia i Brazylia, w dalszej kolejności Chiny. W XXI w. nastąpiło istotne, w ujęciu geograficznym, przeniesienie ośrodków pierwotnej produkcji do Afryki (Demokratyczna Republika Konga – DRK, Rwanda, Nigeria). Mocną pozycję utrzymała nadal Brazylia. Zmalało wyraźnie znaczenie Kanady, Australii i państw byłego bloku sowieckiego.

Od 1974 r. analiz rynku tantalu oraz informacji o stabilności łańcucha dostaw dostarcza organizacja zrzeszająca producentów i konsumentów tantalu i niobu (*Tantalum-Niobum International Study Centre* – TIC). Do organizacji nie przystąpił ZSRR, a później, po odzyskaniu państwowości, nie przyłączyły się Ukraina i Kazachstan. Wykorzystanie tantalu w przemyśle zbrojeniowym po-

wodowało, że dane o produkcji górniczej Związku Radzieckiego nie były ujawniane. W obecnych statystykach, np. amerykańskiej służby geologicznej (USGS), wielkość produkcji w Rosji pojawia się dopiero od roku 2020 r., natomiast w republikach postsowieckich (Kazachstan, Ukraina) dane te nie są dostępne, chociaż jest bardzo prawdopodobne, że odbywa się tam wytwórczość tantalu rzędu kilkudziesięciu ton rocznie (Szluga, Smakowski, 2015). Produkcja tantalu jest obecnie prowadzona w około 20 krajach, w porównaniu do ok. 30–40 zaraz po II wojnie światowej.

Tantal jest twardym, kowalnym, stalowoszarym metalem, odpornym na korozję oraz działaniem większości kwasów i zasad. Ma bardzo wysoką temperaturę topnienia i cechuje się wysoką biokompatybilnością. O znaczeniu gospodarczym tantalu decyduje w głównej mierze koniunktura przemysłu elektronicznego, gdzie jest wykorzystywany do produkcji kondensatorów elektrolitycznych. Wspomniana odporność chemiczna predestynuje tantal do wykorzystywania w produkcji aparatury chemicznej (wymieniki ciepła, rury, zawory i zbiorniki na kwasy). Tantal jest stosowany jako dodatek stopowy do specjalnych gatunków stali nierdzewnej i kwasoodpornej. Jako składnik nadstopów zapewnia im wytrzymałość i stabilność faz. Stopy tantalu są stosowane w branżach: lotniczej i astronautycznej (wykładziny wewnątrz komór spalania silników statków kosmicznych i samolotów), elektronicznej i medycznej (narzędzia chirurgiczne i dentystyczne). Tantal dobrze poddaje się obróbce i spawaniu. Wytwarza się z niego także wyroby zegarmistrzowskie i jubilerskie. Węgiel tantalu (TaC) jest bardzo twardy i jest składnikiem węglików spiekanych, tlenek tantalu (Ta₂O₅) jest składnikiem szkieł optycznych oraz warstw elektroluminescencyjnych. Tantal i jego związki są wykorzystywane w technologii materiałów mikroelektronicznych – np. półprzewodnikowe warstwy amorficzne Cu₂₀Ta₈₀, diody półprzewodnikowe Ta-Si-GaAs (Skrzypek, 2012).

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; krzak@agh.edu.pl; kkrol@geol.agh.edu.pl

² Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków; agalas@min-pan.krakow.pl

W ocenie Komisji Europejskiej (EC, 2020) tantal jest zaliczany do grupy surowców krytycznych. Cechuje go średnie znaczenie gospodarcze wśród surowców objętych tą listą i jednocześnie niskie ryzyko zaopatrzenia (ryc. 1). Według brytyjskiej służby geologicznej (BGS) względne ryzyko stabilności dostaw jest kwalifikowane jako średnie – w dziesięciostopniowej skali wynosi ono 7,1 pkt (BGS, 2015).

RUDY, ZŁOŻA I ŚWIATOWE ZASOBY TANTALU

Tantal jest pierwiastkiem rozproszonym w skorupie ziemskiej i nie występuje w przyrodzie w stanie wolnym. Udziały wagowe tantal, według różnych autorów, wynoszą od 0,74 do 5,7 ppm (Rudnick, Sally, 2003), a jego klark jest przyjmowany na poziomie 0,7 ppm (Rudnick, Sally, 2003; BGS, 2011). Podwyższona zawartość jest odnotowywana w skałach alkalicznych i karbonatytach. W procesach hipergenicznych minerały tantal są odporne na wietrzenie i tworzą niekiedy wtórne złoża o znaczeniu gospodarczym.

Większość minerałów pełniących funkcję nośników tantal to tlenki – znane są również krzemiany, jednak ich wystąpienia są bardzo nieliczne. Tantalowi towarzyszy zwykle niob, a szereg kolumbit $(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ – tantalit $(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$ jest najpowszechniej występującą fazą mineralną Nb i Ta o najważniejszym znaczeniu przemysłowym i potocznie jest nazywany coltanem.

Wodginit $(Ta,Nb,Sn,Mn,Fe)O_2$ jest kolejnym istotnym źródłem odzysku tantal. Minerały z grupy pirochloru $(Na,Ca)_2Nb_2O_6(O,OH,F)$, jakkolwiek wzbogacone zwykle w tantal (mikrolit), dostarczają przede wszystkim niobu, a jako źródło tantal są traktowane podrzędnie.

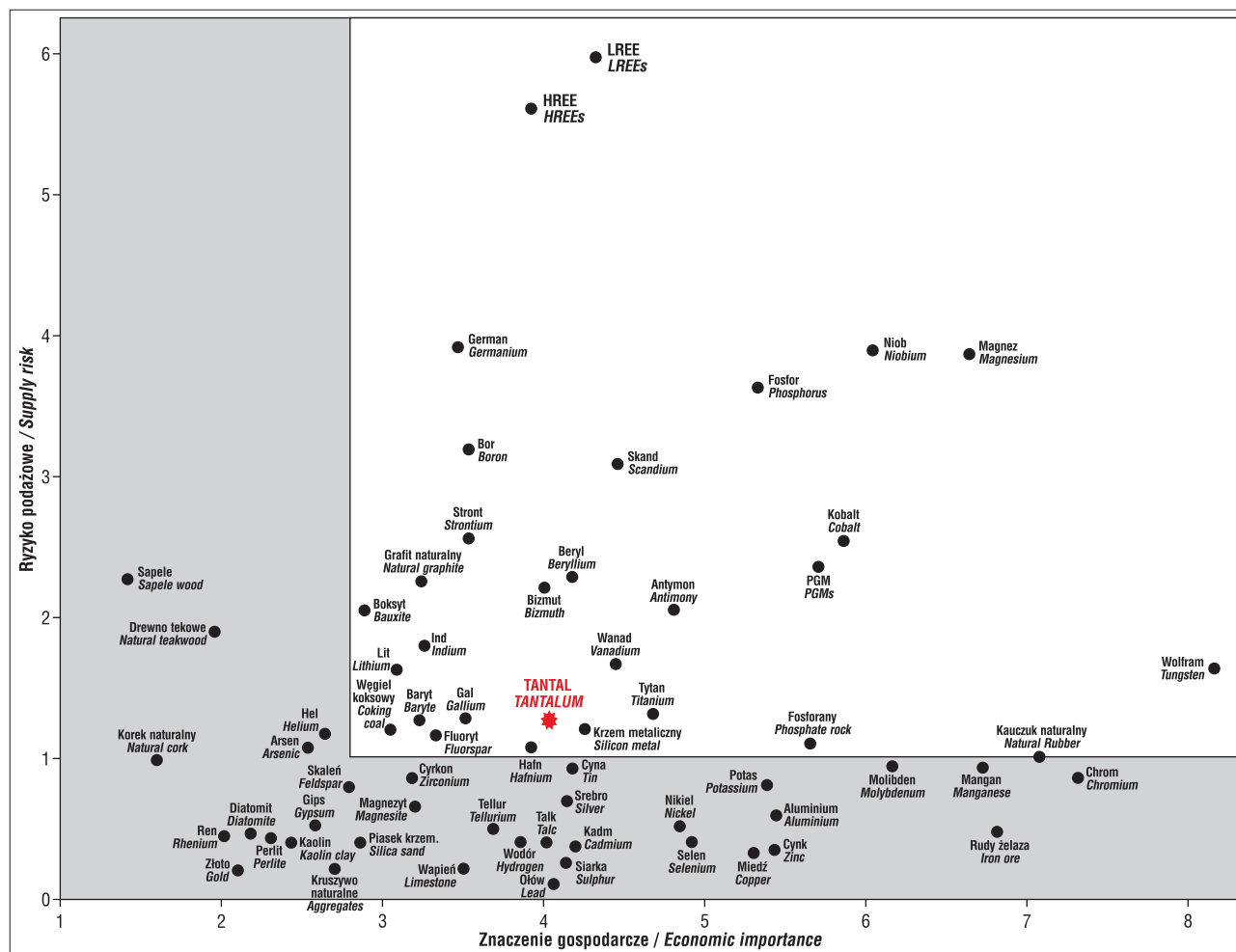
Złoża rud tantal o znaczeniu gospodarczym są nieliczne, rozmieszczone w kilkunastu krajach świata (ryc. 2) i najczęściej są związane ze skałami magmowymi (granity, pegmatyty, sjenity i karbonatyty). Znane są ponadto złoża wtórne, powstałe wskutek wietrzenia złóż pierwotnych i późniejszych procesów osadowych.

Tantal tworzy niekiedy samodzielne złoża rud, jednak częściej jest kopaliną towarzyszącą rudom innych metali (głównie Sn, Li, Nb). Rudy mają zwykle skład kompleksowy: Nb-Ta lub Li-Cs-Be-Ta-(Sn) i występują w trzech typach złóż (BGS, 2011):

- 1) karbonatytowych,
- 2) alkalicznych i peralkalicznych granitach i sjenitach,
- 3) granitach i pegmatytach typu LCT (lit-ciez-cyna – *lithium-caesium-tantalum*).

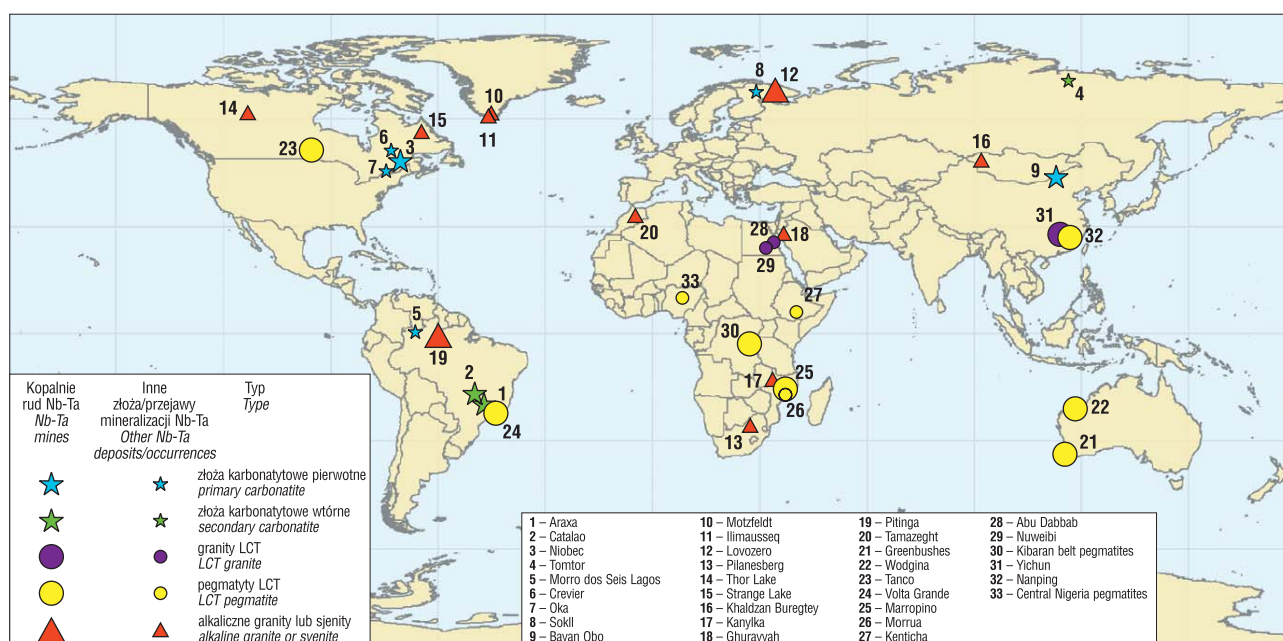
Osobno są wyróżniane złoża okruczowe, które są związane ze zwietrzeliną wymienionych pierwotnych typów złóż. Są z nich pozyskiwane koncentraty tantalitowe, tantalitowo-niobowe i inne tantalonośne.

Złoża karbonatytów występują zwykle w formie stromych pni, dajek lub kopulastych intruzji. Składają się głównie (ponad 50%) z kalcytu i dolomitu. Ich zonalną budowę podkreślają żyły różnorodnych, często bardzo



Ryc. 1. Tantal na tle surowców krytycznych dla gospodarki UE (EC, 2020)

Fig. 1. Tantalum on a background of critical raw materials for the EU economy (EC, 2020)



Ryc. 2. Rozmieszczenie kopalń i głównych typów złóż rud Nb-Ta (BGS, 2011)

Fig. 2. Distribution of major Nb-Ta mines and deposits – by deposit type (BGS 2011)

rzadkich minerałów. Często występują w sąsiedztwie intruzji sjenitów nefelinowych oraz rzadziej kimberlitów, piroksenitów i perydotytów. Karbonatyty stanowią najważniejszy typ złóż pierwiastków ziem rzadkich (REE). Typowe przykłady to: Niobec, Oka, Blue River, Crevier i Upper Fir w Kanadzie; Araxá, Catalão I i II, Morro dos Seis Lagos w Brazylii; Mount Weld w Australii i Bayan-Obo w Chinach (Paulo, Strzelska-Smakowska, 1993; Orris, Grauch, 2002; BGS, 2011; Fan i in., 2016; Schulz i in., 2017).

Złoża alkalicznych granitów i sjenitów (albitytowe) są zwykle związane ze strefami ryftów i zapadlisk na platformach, za łukiem magmowym orogénów. Mogą to być samodzielne małe intruzje alkaliczne lub te części wielkich maszywów magmowych, które charakteryzują się znaczną alkalicznością. Złoża tego typu wykazują znaczną zmienność mineralizacji, a tym samym zawartości składnika użytecznego. Są to złoża REE z dużą zawartością cyrkonu, itru, niobu, tytanu, berylu, toru i uranu. Typowym przykładem jest złożo Thor Lake i Strange Lake w Kanadzie. W kompleksie intruzywnym Blachford Lake (granity i sjenity) występuje formacja alkaliczna Nechalacho – nefelinowy sjenit silnie okruszczony Be, Y, REE, Nb i Ta. Nośnikiem Ta jest kolumbit i tantalit. Inne obiekty, w których nośnikiem tantalitu jest łoparyt w agpaitowych sjenitach nefelinowych, to Kanyika (Malawi), Ghurayyah (Arabia Saudyjska), Łowozero (Rosja), Motzfeldt i Ilimaussaq (Grenlandia) Pitlinga (Brazylia), Pílanesberg (Republika Południowej Afryki), Yichun (Chiny) oraz Bikita (Zimbabwe) (Paulo, Strzelska-Smakowska, 1993; Orris, Grauch, 2002; BGS, 2011; Schulz i in., 2017).

Złoża granitów i pegmatytów LCT powstają jako końcowe fazy procesów magmowych lub też metamorficznych, wskutek działania roztworów hydrotermalnych, zwykle obficie zmineralizowanych i bogatych w cynę. Najczęściej są to pegmatyty z dobrze wykryszalowanym kasyterytem. Towarzyszą im koncentracje: Ta, Nb oraz W, Li, Be i Cs. Koncentracje Ta odkryto dotychczas tylko w pegmatytach archaiku i proterozoiku. Przykładem jest złożo Greenbushes w Australii, uznane za największy na świecie kompleks pegmatytowy. Początkowo wydobywano zwie-

trzelinę pegmatytów, a obecnie w kopalni podziemnej eksploatuje się pegmatyty. Pozostałe złoża tego typu to: Wodgina i Bald Hill (Australia), Volte Grande i Mibra (Brazylia), Kenticha (Etiopia), Marropero (Mozambik), Abu Dabbab i Nuweibi (Egipt), Yichun (Chiny) i Tanco (Kanada) (Paulo, Strzelska-Smakowska, 1993; Orris, Grauch, 2002; BGS, 2011; Schulz i in., 2017).

Wyróżniane w niektórych klasyfikacjach złoża okruszkowe obejmują strefy wietrzeniowe, zwykle ponad pierwotnymi wystąpieniami karbonatytów, granitów i pegmatytów z okruszczowaniem Nb-Ta lub sekwencje osadowe w bezpośrednim sąsiedztwie intruzji. Są one typowe dla krajów tropikalnych (środkowa Afryka, Australia, Brazylia). Wychodnie pierwotnych skał przykrywa zwykle zwietrzelina kaolinowo-illitowa z luźnymi ziarnami tantalitu, kolumbitu, U-mikrolitu, kasyterytu i scheelitu. Zawartość Ta sięga 15–100 g/m³ (Paulo, Strzelska-Smakowska, 1993). Złoża okruszkowe występują w promieniu nieprzekraczającym 1 km od wychodni skał pierwotnych, a więc typowa dla złóż okruszkowych redepozycja składników użytecznych nie ma w tym wypadku miejsca lub jest obserwowana na małą skalę. Przykładowe złoża to: Araxá i Catalão (Brazylia), Tomtor (Rosja), Greenbushes (Australia) i Lueske (DRK).

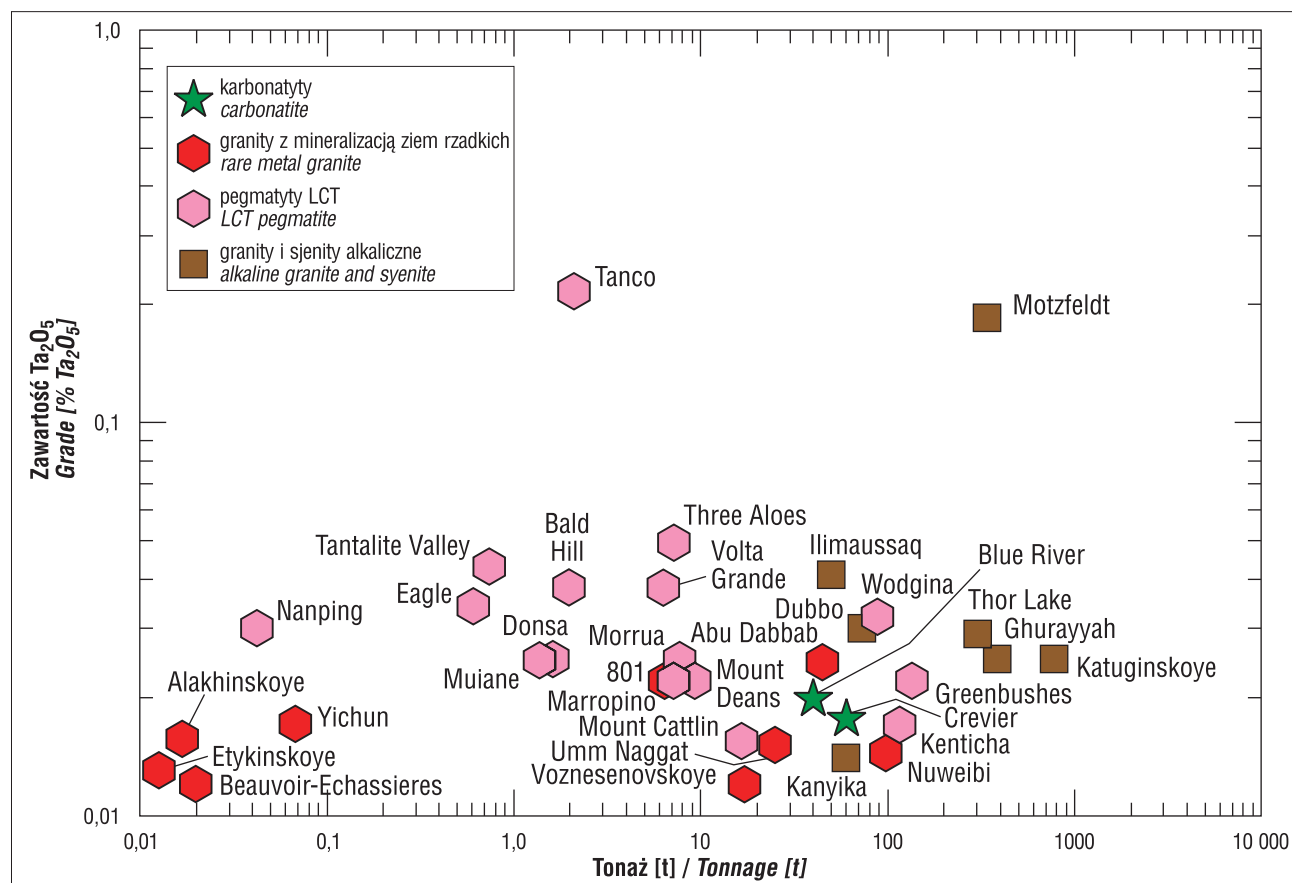
Większość złóż Ta o znaczeniu gospodarczym, w porównaniu do złóż innych metali, to małe obiekty geologiczne (ryc. 3). Przeważają złoża zawierające od 1 do 100 mln ton rudy Ta₂O₅. Całkowita wielkość zasobów to zwykle kilkaset mln ton rudy o relatywnie niskiej zawartości wagowej metalu.

Światowe zasoby Ta o znaczeniu gospodarczym, według ocen USGS (tab. 1), wynoszą ponad 140 tys. ton (Callaghan, 2021), podczas gdy zasoby geologiczne są szacowane na ok. 300 tys. ton, zatem zakładając obecny poziom wydobycia zapewniają niemal 100-letnią wystarczalność. Trzeba nadmienić, że dostępne statystyki światowych zasobów tantalitu pozostają znacznie zróżnicowane. Bardziej precyzyjne, choć nadal nie zawsze do końca wiarygodne, są dane o zasobach pojedynczych, zagospodarowanych górnictwo złóż lub projektów geologiczno-górnictwowych

przewidywanych do rychłego zagospodarowania, szczególnie w Australii, Brazylii czy Kanadzie.

Produkcja górnicza jest prowadzona w kilku obszarach, z rosnącym sumarycznie natężeniem, podczas gdy w latach 2000–2020 baza zasobowa kopalin tantalumu została dokładniej rozpoznana i uległa istotnemu powiększeniu, a jej ocena jest zmienna w czasie i dynamiczna, uzależniona od koniunktury rynkowej (głównie cen Sn, Li i Nb). Największym zapleczem podażowym dysponują Brazylia

i Australia. Kraje te raportują posiadanie niemal 100% światowych zasobów Ta – uwzględnianych w statystykach USGS. Znaczące zasoby posiadają niewątpliwie Chiny, DRK, Etiopia, Mozambik, Rwanda i Rosja. Część łatwo dostępnych zasobów znajduje się w niestabilnych gospodarczo i politycznie krajach środkowej Afryki. Brak danych o zasobach tych krajów jest powodowany niedoborem wykwalifikowanej administracji geologicznej (Simandl i in., 2018).



Ryc. 3. Relacja jakości do tonażu głównych złóż tantalumu z podziałem na typy genetyczne (Schulz i in., 2017)

Fig. 3. Grade versus tonnage of major tantalum deposits in the world, by deposit type or source, in million metric tonnes (Schulz et al., 2017)

Tab. 1. Zmiany światowej bazy zasobowej tantalumu (tony) w latach 2000–2020 (Cunningham, 2001; Magyar, 2006; Papp, 2011, 2016; Padilla, 2020; Callaghan, 2021)

Table 1. Changes of global tantalum resource base (tonnes) in the years 2000–2020 (Cunningham, 2001; Magyar, 2006; Papp, 2011, 2016; Padilla, 2020; Callaghan, 2021)

	2000		2005		2010	2015	2019	2020
	Zasoby przemysłowe Reserves	Zasoby geologiczne Resources	Zasoby przemysłowe Reserves	Zasoby geologiczne Resources	Zasoby przemysłowe Reserves			
Australia Australia	25 000	45 000	40 000	80 000	40 000	67 000	55 000 15 000 (JORC)	99 000 44 000 (JORC)
Brazylia Brazil	ND	3 000	ND	ND	65 000	36 000	34 000	40 000
Kanada Canada	3 000	5 000	3 000	ND	ND	ND	ND	ND
Nigeria Nigeria	ND	7 000	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mozambik Mozambique	ND	ND	ND	ND	3 200	ND	ND	ND
Świat World	28 000	60 000	43 000	150 000	> 100 000	> 100 000	> 90 000	> 140 000

ND – dane niedostępne / data not available

Schulz i in. (2017), identyfikując geologiczny potencjał zasobowy tantalitu, wskazują na Brazylię jako dominującego potentata, gdzie jest ulokowanych około 40% światowych zasobów. Pozostałe udziały mają Australia (20%), Chiny i południowa Azja (11%), Rosja i środkowy wschód (10%), środkowa Afryka (9%), pozostała Afryka (7%), północna Ameryka (2%) i Europa (1%). Złoża w Brazylii są związane głównie z rozległymi kompleksami karbonatytowymi bądź pegmatytami, podczas gdy w Australii są to przeważnie pegmatyty LCT. Stany Zjednoczone wykazują około 55 tys. ton tantalitu w złożach udokumentowanych, których eksploatacja jest jednak uznawana za nieopłacalną wobec cen z 2020 r. (Callaghan, 2021).

W Polsce nie są znane złoża tantalitu i brak jest perspektyw na odkrycie obiektów o znaczeniu gospodarczym.

PRODUKCJA PIERWOTNA I DOSTAWY

Tantal jest najczęściej kopalnią towarzyszącą rudom innych metali (głównie Sn, Li, Nb), w związku z tym wahania cen i popytu tych metali mogą powodować zmiany dynamiki jego wydobycia i opłacalności pozyskiwania. Produkcja pierwotna tantalitu jest prowadzona w stosunkowo nielicznych krajach (tab. 2).

Dominującym źródłem dostaw jest wydobycie z licznych, lecz małych, rzemieślniczych kopalń (*artisanal and*

small scale mining – ASM). Niewielkie, ale łatwo dostępne złoża zagospodarowano w krajach Afryki: Nigerii, DRK, Zimbabwe, Rwandzie czy Namibii (Melcher i in, 2008). Roskill (2020) szacuje udział tej produkcji na nieco ponad 50% w skali świata, pozostałe wolumeny zapewnia produkcja ze złóż tantalowych (33%) i pozyskanie tantalitu jako produktu ubocznego z kopalń innych kopalni metalicznych, głównie litu (14%). Przewidywana jest zmiana tej struktury w ciągu najbliższych 5–10 lat, w wyniku której udział ASM ulegnie pomniejszeniu do około 1/3 strumienia dostaw, a zwiększy się wkład produkcji z pozostałych źródeł, głównie na skutek wzrostu produkcji litu i rosnącego zapotrzebowania na ten surowiec przemysłu motoryzacyjnego.

Światowa produkcja pierwotna tantalitu w dwóch dekadach XXI w. to naprzemienne okresy wzrostów i spadków. Maksima produkcji przekraczające 1500 t odnotowano w latach 2002 i 2004, rekordowe wielkości powyżej 1800 t w 2018 r. (ryc. 4).

Główni producenci tantalitu zmieniali się z biegiem lat, niektórzy z nich niekiedy zupełnie wygaszali działalność. Od końca lat 80. XX w. umacniała się pozycja Australii, która aż do 2009 r. była najważniejszym producentem tantalitu i jego koncentratów. W 2001 r., jak i niemal w całej pierwszej dekadzie XXI w., z Australii i Brazylii pochodziło 90% podaży (ryc. 5).

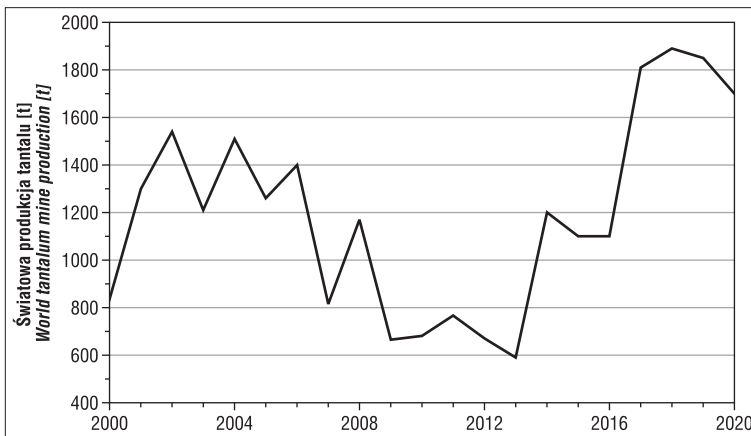
Tab. 2. Produkcja górnicza Ta w latach 2000–2020 (Cunningham, 2001; Magyar, 2006; Papp, 2011, 2016; Padilla, 2020, Callaghan, 2021)

Table 2. Mine tantalum production in the years 2000–2020 (Cunningham, 2001; Magyar, 2006; Papp, 2011, 2016; Padilla, 2020; Callaghan, 2021)

	2000	2010	2015	2019	2020 ^c		Relacja 2020/2000 [%] Proportion 2020/2000 [%]
					Wydobycie [t] Output[t]	Udział [%] Share [%]	
Australia <i>Australia</i>	485	ND	ND	67	30	1,7	6
Brazylia <i>Brazil</i>	90	180	115	430	370	21,5	411
Kanada <i>Canada</i>	57	ND	–	–	–	–	–
Kongo (Kinshasa) <i>Congo (Kinshasa)</i>	130	ND	350	580	670	39	515
Rwanda <i>Rwanda</i>	–	110	410	336	270	15,7	–
Etiopia <i>Ethiopia</i>	38	ND	ND	70	60	3,5	158
Mozambik <i>Mozambique</i>	–	120	ND	ND	ND	–	–
Burundi <i>Burundi</i>	–	–	–	38	30	1,7	–
Nigeria <i>Nigeria</i>	4	ND	ND	180	160	9,3	4000
Rosja <i>Russia</i>	ND	ND	ND	26	26	1,5	–
Chiny <i>China</i>	–	ND	60	76	70	4,1	–
Inne kraje <i>Other countries</i>	122	271 ^a	165	47	35	2	29
Świat <i>World</i>	836	681	1100	1850	1720	100	206

Objaśnienia: e – dane szacunkowe; a – obejmuje następujące kraje: Burundi, Kongo (Kinshasa), Etiopia, Somalia, Uganda, Zimbabwe; ND – dane niedostępne

Explanations: e – estimated data; a – includes the following countries: Burundi, Congo (Kinshasa), Ethiopia, Somalia, Uganda, Zimbabwe; ND – data not available

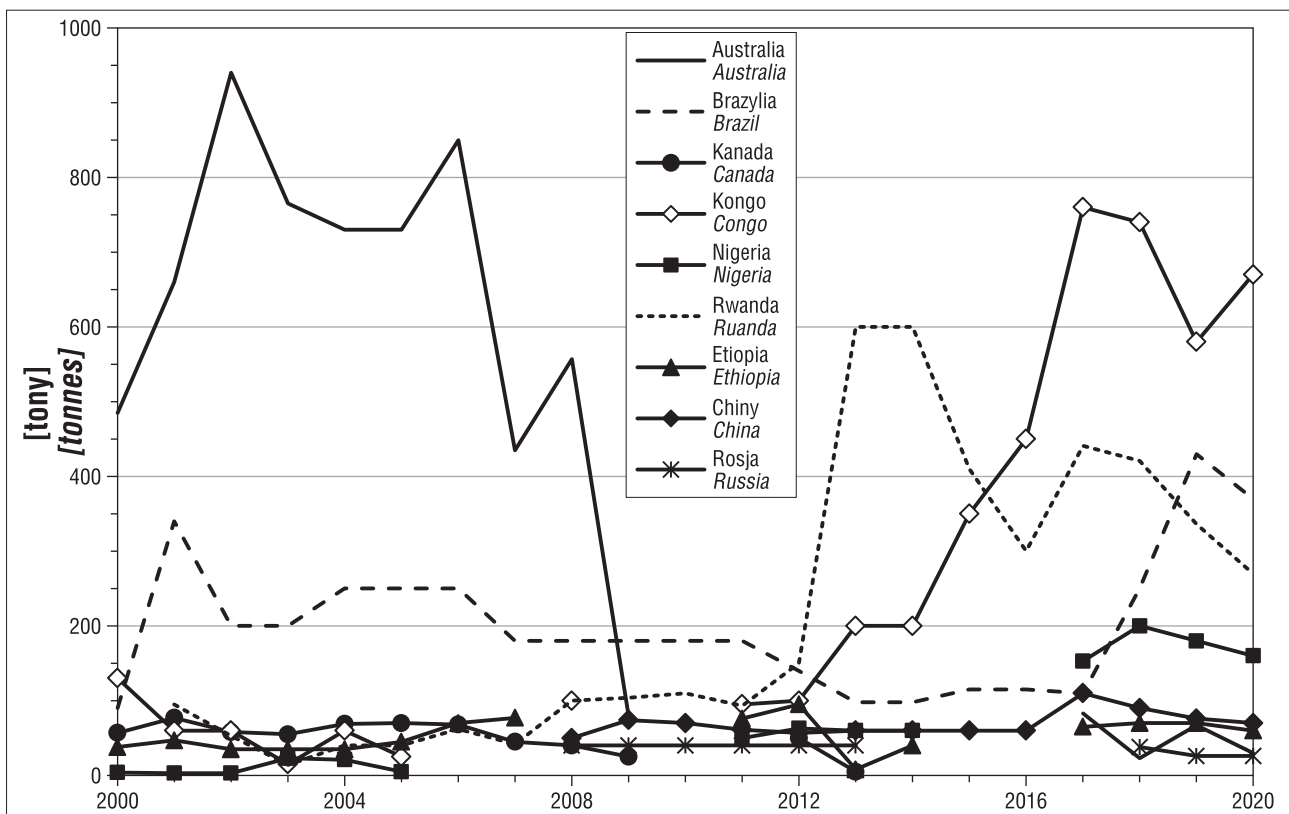


Ryc. 4. Światowa produkcja tantalum w latach 2000–2020 (na podstawie danych USGS, tony zawartego metalu)

Fig. 4. World tantalum mine production in the years 2000–2020 (based on USGS data, data in tonnes of metal content)

Zanik produkcji w Kanadzie zbiegł się z odkryciem i zagospodarowaniem złóż w Tajlandii. Prace techniczne (remonty, udostępnienie nowych partii złóż) w dwóch najważniejszych kopalniach w Australii (należących do *Talison Minerals* – obecnie *Global Advanced Metals*): *Greenbushes* (rudny Sn, Li) i *Wodgina* (rudny Fe, Li) spowodowały, że w latach 2007–2012 produkcja tantalum w Kanadzie całkowicie wygasła. Miejsce lidera dostaw początkowo zajęła Brazylia, gdzie rozpoczęto wydobycie w złożach: *Barreiro* (*Cia, Brasileira de Metalurgia e Mineração*), *Catalão* (*Anglo American Brazil Ltd.*) oraz *Volta Grande* (*CIF Mineração*). Przypuszcza się, że wzrost znaczenia producentów ze środkowej Afryki był spowodowany recesją na rynku metali w 2008 r. i spadkiem cen koncentratów Ta_2O_5 . To

spowodowało wygaszenie produkcji w Australii, Kanadzie, ale także w Mozambiku i Etiopii (ryc. 5). W rezultacie po zużyciu zapasów nastąpił wzrost cen i możliwość wejścia na rynek producentów, którzy dysponowali łatwo dostępnymi zasobami rudy (DRK, Rwanda, Burundi). Jednocześnie (2009/2010) zmniejszyło się światowe zapotrzebowanie na kondensatory, których produkcja jeszcze w 2007 r. zużywała 60% Ta. Spadek ten był spowodowany ograniczeniem produkcji komputerów na rzecz zwiększenia dostaw tabletów, które nie wymagają kondensatorów. W efekcie znacznie zredukowano wydobycie Ta w Kanadzie, która aż do 2010 r. była liczącym się konkurentem. W latach 2010–2014 największym producentem koncentratów tantalum okazała się Rwanda (31% produkcji światowej) i DRK (19%), a Brazylia zajmowała trzecie miejsce (14%). Trzeba zaznaczyć, że liczne kopalnie w Afryce (Etiopia – *Kenticha Mine*, Nigeria, Mozambik – *Noventa Ltd.*) były oceniane jako ryzykowne w ujęciu dostaw ze względu na archaiczne metody eksploatacji i niestabilną sytuację polityczną. Eksploatacja jest tam często prowadzona przez małe podmioty, bez koncesji i uregulowanego statusu. Całkowita podaż z państw afrykańskich stanowi prawie 65% światowej podaży pierwotnej i pochodzi prawie wyłącznie z ASM. Na ten sposób eksploatacji przychylnym okiem patrzą lokalne władze państwowe, bo w wielu przypadkach zapewnienia on pozyskanie środków do życia i spokój społeczny (Wołkowicz, 2013). Istnieją obszary, gdzie produkcja jest kontrolowana przez lokalne grupy bojowników, którzy wykorzystują miejscową ludność do niewolniczej pracy. Mimo to w latach 2010–2014 aż 95% dostaw tantalum dla Unii Europejskiej pochodziło z Afryki, a od 2009 r.



Ryc. 5. Najwięksi producenci tantalum w latach 2000–2020 (na podstawie danych USGS, tony zawartego metalu)

Fig. 5. The largest tantalum mine producers (based on USGS data, data in tonnes of tantalum content)

więcej niż 50% światowej produkcji pochodzi z tego kontynentu. Bardzo prawdopodobne jest, że wysoka pozycja na rynku producentów z subsaharyjskiej Afryki wynika z prowadzenia rabunkowej gospodarki, często wiąże się ze stosowaniem terroru wobec pracowników, choć sygnałami zmian są np. działania Ministerstwa Zasobów Rwandy, gdzie od 2016 r. jest prowadzony monitoring kopalń i nadzór nad pochodzeniem pierwotnych surowców tantal. Pomimo zmian kraje skupione wokół regionu Wielkich Jezior Afrykańskich nadal są uważane za ryzykownych partnerów handlowych. Biorąc pod uwagę jako miarę koncentracji rynku indeks Herfindahla-Hirschmana (HHI), rynek dostaw tantal wy-daje się być umiarkowanie lub nawet silnie skoncentrowany (DERA, 2018).

Na początku 2019 r. obserwowano wzrost podaży niskokosztowych koncentratów tantalowych jako produktów ubocznych. Za trend ten odpowiadały dwie kopalnie litu w Australii Zachodniej, jednak w sierpniu tego roku tendencja została odwrócona. *Bald Hill Mine* ograniczała operacje wydobywcze, a projekt *Pilgangoora*, zakładający niemal dwukrotne zwiększenie zdolności produkcyjnych litu i tantal, został odroczone w czasie. Jednocześnie brak zgody Ministerstwa Środowiska Estonii uniemożliwił odzyskiwanie niobu i tantal w operacjach *NPM Silmet AS*, ponieważ firma ta osiągnęła limit tonażowy przechowywania radioaktywnych odpadów poflotacyjnych (Padilla, 2020). W 2020 r. na skutek czasowego zamknięcia (z powodu COVID-19) kopalń w Brazylii i Rwandzie ogólnosiwiatowa produkcja tantal była niższa (Callaghan, 2021).

Nieco bardziej złożony obraz produkcji górniczej dostarczały statystyki TIC (TIC, 2020, 2021). Według tych danych w 2019 r. nastąpił spadek produkcji górniczej aż o 26,5% w porównaniu do 2018 r., a od rekordowego 2014 r. o ponad 60%. Odnotowano zmniejszenie dostaw z kopalń tantal, a jeszcze bardziej znaczący spadek zaobserwowano w przypadku produkcji tantal w formie produktu ubocznego. Wzrosło jedynie nieznacznie pozyskanie tego metalu z żużli cynowych. Ujęcie to odbiega od statystyk USGS (Callaghan, 2021) i zapewne jest powodowane niepełnymi danymi statystycznymi, wynikającymi z wycofania się z członkostwa w TIC dużej grupy producentów górniczych.

PRODUKCJA WTRÓNA, OBROTY

Równocześnie ze wzrostem zainteresowania stosowaniem tantal do celów przemysłowych stale zwiększa się na rynku udział tego metalu pozyskiwanego z recyklingu. W 1994 r. było to 8%, w 2010 – 20% i 2017 – 21% (Paulo, Strzelska-Smakowska, 1993; Szługaj, Smakowski, 2015; TIC, 2018). Trudno przewidzieć, czy nastąpi dalszy rozwój odzyskiwania Ta, gdyż główny surowiec – kondensatory – nie łatwo poddaje się recyklingowi (Simandl i in., 2018). Powoduje to, że nie ma zorganizowanego recyklingu tantal, wykorzystującego zużyte produkty zawierające ten metal, jak również perspektyw jego rozwoju (DERA, 2018).

W Polsce tantal odzyskiwano z surowców wtórnych w zakładach CEMAT '70 Centrum Naukowo-Produkcyjnego Materiałów Elektronicznych S.A. w Skawinie. Obecny, większościowy udziałowiec spółki nie prowadzi odzysku tantal.

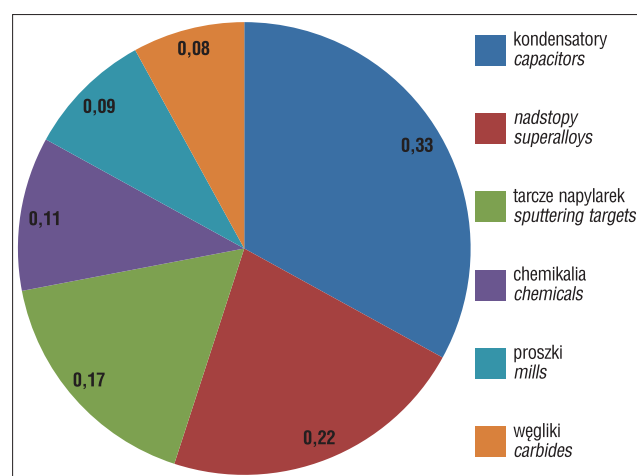
Podstawowymi surowcami tantal w obrocie międzynarodowym są koncentraty zawierające minimum 30% Ta₂O₅, jakkolwiek koncentraty o niższej jakości (min. 20% Ta₂O₅) również znajdują nabywców. Cena koncentratu jest zwykle

pochodną samej zawartości Ta₂O₅ – ewentualne domieszki Nb₂O₅ przeważnie są ignorowane. O możliwości zbytu koncentratów decyduje ponadto zawartość pierwiastków promieniotwórczych. Zanieczyszczenia torem i uranem dyskwalifikują je jako surowiec z obrotu handlowego (TIC, 2021). Oprócz koncentratów przedmiotem obrotu są proszki tlenku tantal o czystości 99,5 lub 99,99% oraz tantal metaliczny o czystości 99,9%, 99,95% i 99,99%, dostarczany zwykle w formule EXW lub FOB. Największe dostawy pochodzą z Brazylii i krajów afrykańskich, podczas gdy najbardziej chłonne rynki to kraje wysoko rozwinięte, np. Japonia, USA, Niemcy i Wielka Brytania.

Poziom importu surowców tantal do Polski waha się od setek kg do nieco ponad 2 t. Dostawy obejmują tantal nieobrobiony (w tym proszki i złom) oraz wyroby z tantal (sztaby, pręty, kształtowniki, drut, blachy, taśmy i folie), pochodzące głównie z Niemiec i Austrii, a także z Chin i USA. Systematycznie notowany był również reeksport odpadów, złomu i wyrobów z tantal, przeważnie do Niemiec, Wielkiej Brytanii i Rosji. Saldo jakościowe obrotów surowcami tantal miało zwykle ujemną wartość, jakkolwiek przy dużym udziale reeksportu uzyskiwano dodatni bilans, np. w latach 2010 i 2013 (Szługaj, Smakowski, 2015).

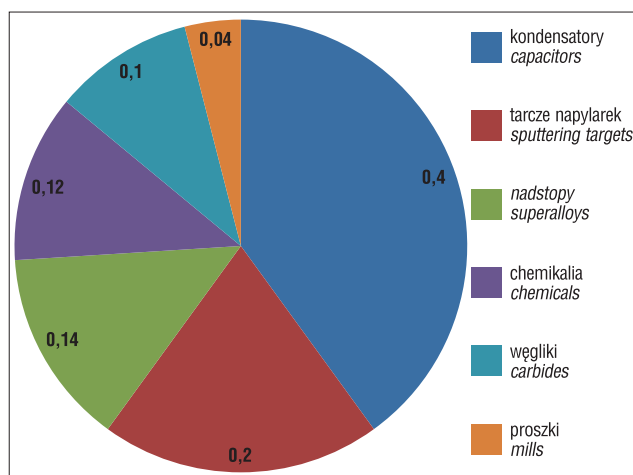
ZASTOSOWANIE, ZUŻYCIE I SUBSTYTUTY

Początkowo tantal był uznawany za uszlachetniacz stali. Po II wojnie światowej nastąpiła istotna zmiana zastosowań. Jest używany przeważnie w postaci metalicznej, wlewki, proszku, stopów z W, Co, Fe i Ni oraz związków chemicznych (tlenki, węglki – temperatura topnienia ponad 3000°C, sole i in.). Największy wpływ na wielkość produkcji tantal miał i nadal ma rozwój elektroniki, technologii budowy statków kosmicznych, reaktorów jądrowych oraz stali narzędziowych. W latach 90. XX w. tantal znalazł szerokie zastosowanie w produkcji kondensatorów. Rozwój technologii pozwolił wykorzystać właściwości tego metalu do magazynowania energii. Do 2010 r. ponad połowę Ta używano do produkcji kondensatorów. Obecnie obserwuje się spadek zainteresowania tą gałęzią przemysłu. Już w 2011 r. do produkcji kondensatorów używano tylko ok. 1/3 całości wytworzonego Ta. W metalurgii stopów w różnych gałęziach przemysłu zwiększa się natomiast udział proszków tantal (ryc. 6).



Ryc. 6. Globalne zużycie końcowe surowców tantal w latach 2010–2014 (Stratton, 2013)

Fig. 6. Global end-use of tantalum in the period 2010–2014 (Stratton, 2013)



Ryc. 7. Struktura zużycia końcowego surowców tantalu w krajach UE (EC, 2020)

Fig. 7. Structure of tantalum end-use in the EU countries (EC, 2020)

Tantal jest używany do nadawania wytrzymałości i odporności na wysokie temperatury superstopom stosowanym w przemyśle lotniczym i energetyce. W przemyśle chemicznym jest wykorzystywany jako wykładzina rur, zbiorników i naczyń. Względna łatwość obróbki i wysoka biokompatybilność tantalu pozwala na zastosowanie go w medycynie – z jego udziałem są wykonywane np. stenty do podtrzymywania naczyń krwionośnych, płytki, zamienniki kości oraz medyczne spinacze i druty. Tlenek tantalum jest przydatny w optyce, ponieważ służy do zwiększenia współczynnika załamania światła przez soczewkę, a z węgla tantalum są wykonywane końcówki narzędzi skrawających (TIC, 2018).

Najszerzym polem zastosowań tantalum w UE, podobnie jak na świecie (ryc. 7), jest produkcja kondensatorów. W UE większość tantalum wykorzystywanego do wyrobu kondensatorów pochodzi z importu, a nie z własnego wydobycia. Drugim ważnym zastosowaniem jest produkcja tarcz do napylania, które są wykorzystywane do osadzania powłok w celu zabezpieczenia, modyfikacji lub uszlachetnienia oryginalnej powierzchni. Ze względu na znaczenie sektora lotniczego ważnym zastosowaniem tantalum w UE są również superstopy. Nadstopy znajdują zastosowanie w produkcji silników odrzutowych, a także lądowych turbin gazowych (EC, 2020).

Udział UE w imporcie surowców Ta jest trudny do oszacowania, wg EC (2017, 2020) mieści się zazwyczaj w granicach 50–100 t rocznie. Należy jednak zwrócić uwagę, że UE importuje 500–600 t kondensatorów zawierających Ta. Wykorzystuje też około połowę tantalum zużywanego do produkcji specjalnych stopów stosowanych w przemyśle lotniczym i raketowym.

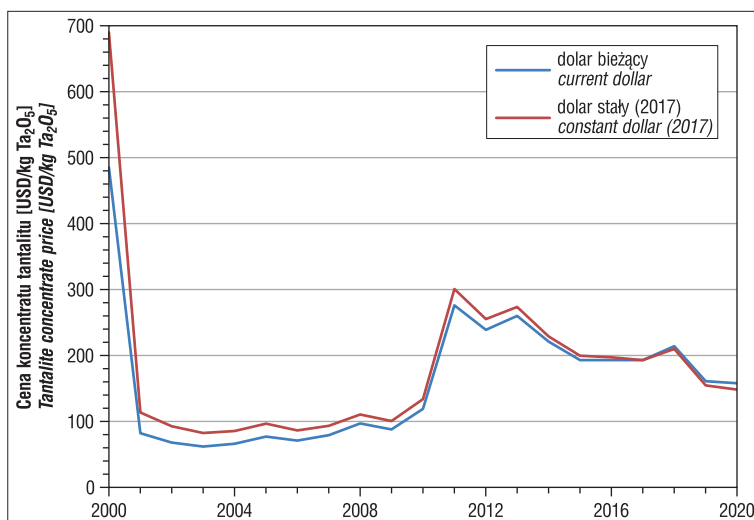
Właściwości tantalum są tak unikalne, że wszelkie substytuty zwykle powodują obniżenie jakości produktu, zwiększenie jego gabarytów, masy lub parametrów użytkowych. Można stwierdzić, że najbliższym substytutem jest niob. Niob także jest stosowany do produkcji kondensatorów, ale znacznie skraca czas ich pracy. Podobne właściwości stopów stali specjalnych można uzyskać, dodając Mo, V, Ni i Co, ale są one droższe. W produkcji materiałów

ogniotrwałych tantalum jest zastępowany przez Hf, Ir, Mo, Nb i W. W produkcji kondensatorów jest wypierany przez kondensatory ceramiczne i na bazie aluminium (Polyak, 2018; Padilla, 2020).

CENY

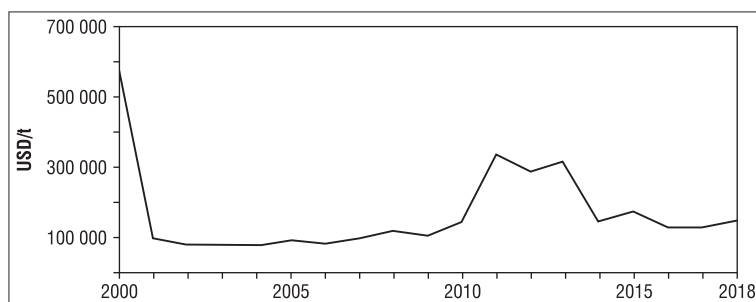
Rynki mniej pospolitych w obrocie metali są zwykle dość nieprzejrzyste, a zmienność cen jest najczęściej pochodną rzeczywistego popytu na surowce i możliwości podaży, a nie wynikiem np. spekulacji, choć te bywają też motorem wahań. Dla cen tantalum nie bez znaczenia jest fakt, że większość dostaw pochodzi z krajów obciążonych dużym ryzykiem gospodarczym i politycznym. Przedmiotem obrotu jest najczęściej koncentrat, rzadziej proszek lub metal. Indeksowanie cen koncentratów, najpowszechniejszych surowców obrotu handlowego, bywa kłopotliwe z racji zróżnicowania i zmiennej zawartości Ta_2O_5 . Transakcje surowcami tantalum są zwykle umowne, a ceny i wielkości obrotu nie są zazwyczaj ujawniane.

Starsze analizy cen surowców tantalum, dotyczące okresu 1960–1990, wskazują, że rynek tantalum był wyjątkowo niespokojny, podatny na zakupy spekulacyjne, często wynikające z niepewności dostaw. Współcześnie sytuacja jest bardziej stabilna, jakkolwiek nie wypracowano jednolitych sposobów notowań, a kwotowanie dostaw odbywa się na drodze negocjacji i kontraktów bilateralnych. W dekadach 1960–1990 cena 1 kg koncentratu Ta_2O_5 mieściła się w przedziale 20–50 USD. Wyjątkiem były lata 1979–1981, kiedy cena ta osiągnęła niemal 300 USD/kg. Dekada 2000–2010 (ryc. 8) rozpoczęła się gwałtowną przeceną na rynku tantalum i gwałtownym spadkiem popytu na tantalum, który nastąpił po dwuletnim okresie eskalacji cen napędzanych popytem przez przemysł elektroniczny. Później ceny utrzymywały się w granicach 50–70 USD/kg. W 2011 r. cena koncentratów tantalum i czystego metalu gwałtownie wzrosła – odpowiednio do 280 000 i 336 000 USD/t (ryc. 8, 9) – i pozostała na tak wysokim poziomie przez trzy lata w wyniku powolnego ożywienia gospodarki światowej, wyczerpywania się zapasów, a także wprowadzenia zapisów dotyczących pochodzenia surowców mineralnych (ustawa Dodd-Franka). Zakłócenia po stronie podaży tradycyjnie miały największy wpływ na trendy cen koncentratów



Ryc. 8. Ceny koncentratów tantalum (min. 30% Ta_2O_5) w latach 2000–2020 (wg danych USGS, 2013; Papp, 2016; Padilla, 2020)

Fig. 8. Tantalite concentrate prices (min. 30% Ta_2O_5) in the years 2000–2020 (based on USGS, 2013; Papp, 2016; Padilla, 2020 data)



Ryc. 9. Cena tantalu metalicznego (<http://www.metalary.com/tantalum-price/>)
Fig. 9. Unit tantalum price (US\$/tonne; <http://www.metalary.com/tantalum-price/>)

w ostatnich latach. Zwiększenie dostępności taniego, ubocznie pozyskiwanego tantalu z wydobycia rud litu spowodowało znaczny spadek cen w latach 2013–2018 (ryc. 8, 9). W latach 2019–2020 średnia cena tantalu spadła o około 26%, co nadal było związane z rosnącą podażą tantalu z rud litowych.

PROGNOZY RYNKU I PODSUMOWANIE

Rynek tantalu jest stosunkowo wąski, biorąc pod uwagę rozproszenie producentów i użytkowników, tym samym jest podatny na szybkie zmiany wolumenów dostaw i cen. Same wahania cen tantalu oraz zmiany technologii w przemyśle elektronicznym powodują, że duże, kosztowne projekty górnicze są wstrzymywane. Rozwijają się natomiast projekty poszukiwawcze dotyczące pozyskiwania innych metali, gdzie obecność tantalu jest rozpatrywana dopiero na etapie projektu górniczego jako możliwy do odzysku produkt uboczny. Od 2011 r. tantal znajduje się na liście surowców krytycznych USA, także Unia Europejska uważa go za pierwiastek krytyczny.

Od 1990 r. główne zużycie tantalu dotyczyło produkcji kondensatorów. Szczególne właściwości tantalu powodują, że kondensatory wytworzone z jego dodatkiem są wyjątkowo stabilne, odporne na uszkodzenia i zapewniają dużą wydajność wolumetryczną i gęstość mocy. Są to parametry wykorzystywane w dużych jednostkach obliczeniowych, komputerach przemysłowych, serwerach itp. Obecnie stosowane ceramiczne kondensatory MLCC klasy II lepiej spełniają wymagania miniaturyzacji i możliwości produkcji na dużą skalę w celu obsługi smartfonów i innych urządzeń przenośnych. Dlatego znaczna część rynku kondensatorów została zajęta lub zostanie wyparta przez kondensatory ceramiczne. Może to oznaczać spadek zapotrzebowania na tantal. Generalizując, w najbliższej przyszłości należy zwrócić uwagę na następujące czynniki decydujące o fluktuacjach na rynku tantalu:

- popyt na lit (prognozowany jest wzrost zapotrzebowania do produkcji pojazdów elektrycznych i hybrydowych, a intensyfikacja produkcji litu spowoduje zapewne zwiększenie dostaw taniego tantalu);
- ograniczenia w produkcji kondensatorów tantalowych (zastępowanie przez ceramiczne);
- zbyt wolne zmiany strukturalne i lokalne konflikty zbrojne w państwach Afryki subsaharyjskiej.

Konflikty militarne w Afryce dwukrotnie przybierały na sile, pierwszy raz pod koniec XX w., a następnie na przełomie wieków. Największe walki i zgrupowania wojsk (w tym armii rządowych) koncentrują się w Demokratycznej Republice Konga. Strefy kontrolowane przez organizacje militarne powstają także w krajach sąsiadujących z DRK. Pod płaszczykiem hasła wyzwolenia oddziały te kontrolują

wydobycie surowców, które zapewnią im przychody wystarczające na zakup broni i kontynuację walk (Bleischwitz i in., 2012). W 2001 r. ONZ zwróciła uwagę, że rozwój technologiczny na świecie odbywa się kosztem zniewolenia rzeszy ludzi w Afryce (w tym kobiet i dzieci), zmuszanych do ciężkiej, niewolniczej pracy. Wstrzymano dostawy Ta i innych surowców z DRK do Europy i USA. W efekcie na rynku pojawiła się produkcja z innych krajów Afryki: Rwandy, Zimbabwe i Mozambiku. Był to częściowo efekt przetrwania produktu, aby ukryć prawdziwe źródło jego pochodzenia. Przyjęta w USA w 2010 r. ustawa o reformie i ochronie konsumentów Dodda-Franka (sekcja 1502), wymuszająca konieczność ujawniania źródeł pochodzenia dostaw, między innymi tantalu, ograniczyła nieco proceder wyzysku. Od 2016 r. tantal (jako coltan – ruda Ta-Nb) znajduje się na liście metali *European Partnership for Responsible Minerals (EPRM)*, których produkcja jest związana z łamaniem praw człowieka. W 2019 r. EPRM rozpoczęło projekt na rzecz poprawy socjalnej sytuacji górników wydobywających tantal ze złóż w DRK i Ugandzie, pozostałe kraje wydają się być poza obszarem działania EPRM ze względu na brak stabilności politycznej i bezpieczeństwa.

W Unii Europejskiej górnicza produkcja tantalu nie jest prowadzona, chociaż w zachodniej i środkowo-wschodniej części tego kontynentu są zlokalizowane jedne z najbogatszych stref występowania mineralizacji wolframowo-cynowo-(tantalowo-litowej). W latach 1961–1985 przeprowadzono kilka wstępnych projektów wydobywczych w granitach Penouta w północnej Hiszpanii (González i in., 2017). Leukogranit Penouta był intensywnie eksploatowany w latach 70. XX w. w celu uzyskania głównie surowców cyny, a koncentraty kolumbitu-tantalitu były produktem ubocznym. Wydobycie i metody przeróbki nie były jednak wydajne, a ceny rynkowe niskie, co doprowadziło do rezygnacji z tych projektów. W stawach osadowych nagromadzono jednak duże ilości odpadów, potencjalnych nośników mineralizacji tantalowej. Obecnie *Strategic Minerals Spain* wykorzystuje stare stawy osadowe i składowiska (ok. 12 Mt odpadów o średniej zawartości 428 ppm Sn i 35 ppm Ta), koncentrując się głównie na dwóch obiektach: *Balsa Grande* (4,8 Mt, 387 ppm Sn i 48 ppm Ta) oraz *Balsa Pequena* (0,22 Mt, 421 ppm Sn i 42 ppm Ta). Rozważane jest ponowne otwarcie kopalni (Alfonso i in., 2020). Wstępne poszukiwania i analizy dotyczące obiektów z mineralizacją litu i towarzyszącym tantalum są prowadzone w Austrii (projekt *Wolfsberg*), Niemczech (*Sadisdorf*), Czechach (*Cinovec*) oraz Portugalii (*Sepeda, Alvarroes, Mina de Barroso*) (TIC, 2019). Spośród wymienionych najbardziej zaawansowany jest projekt *Wolfsberg*, gdzie rozpoczęcie produkcji litu (i prawdopodobnie tantalu) jest prognozowane na 2023 r. (<https://europeanlithium.com>). Potencjalnych złóż tantalu o znaczeniu przemysłowym można oczekiwać w Finlandii, Francji, Norwegii, Szwecji i na Grenlandii. Znaczne ilości Ta zostały wyprodukowane w krajach byłego Związku Radzieckiego (Rosji czy Ukrainie). Produkcja utrzymywała się na poziomie 120–160 ton (Bolewski, 1994), jakkolwiek brak jest wiarygodnych danych. W najnowszych statystykach USGS ponownie ukazuje się Rosja (tab. 2).

Roskill (2020) oczekuje, że ożywienie gospodarki po zakładaniach spowodowanych pandemią COVID-19 doprowadzi do gwałtownego wzrostu popytu na tantal w 2021 r. Prognozuje ponadto powrót do optymistycznych



Ryc. 10. Prognoza zaopatrzenia w surowce tantalum w perspektywie roku 2026 (DERA, 2018)

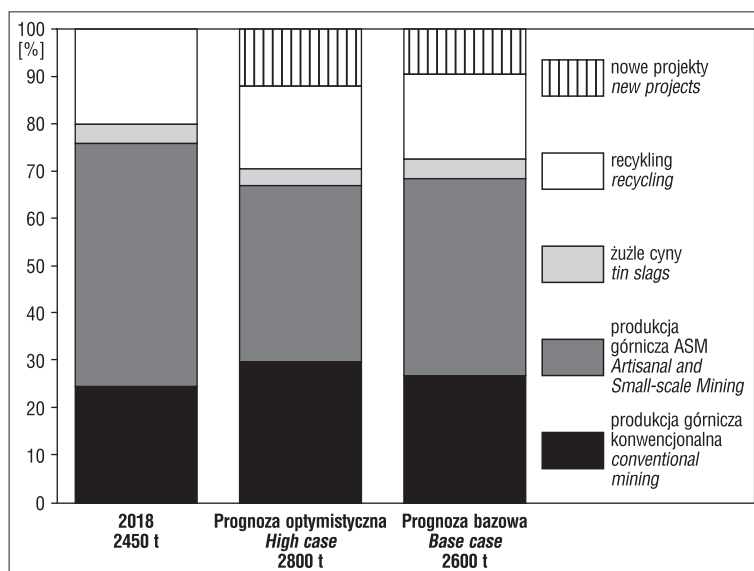
Fig. 10. Tantalum raw materials supply forecast by 2026 (DERA, 2018)

wskaźników wzrostu w długim okresie, szczególnie w sektorach, w których tantal nie ma oczywistych i tanich substytutów. Silny wzrost popytu na tantal będzie wspierany przez rosnące wskaźniki elektryfikacji, zwłaszcza w sektorze motoryzacyjnym, co będzie napędzać wzrost głównego zastosowania końcowego – kondensatorów, a także związków chemicznych tantalum i tarcz napylających. Technologia sieci mobilnej piątej generacji (5G) będzie również stawiać większe wymagania elektroniczne. Oczekuje się, że rozprzestrzenianie się COVID-19 będzie miało negatywny wpływ na produkcję silników lotniczych, podczas gdy w dłuższej perspektywie odejście od paliw kopalnych może zaszkodzić sektorowi, zwłaszcza popytowi na nadstopy w przemysłowych turbinach gazowych (IGT). Niemiecka Agencja Zasobów Mineralnych (DERA, 2018) przewiduje w krótkim czasie dwa scenariusze podaży tantalum na rynku w kontekście dodatkowej produkcji z istniejących kopalń i nowych projektów, a także dostaw z recyklingu i pozyskania z żużli cyny (ryc. 10).

Artykuł powstał przy wsparciu *EIT RawMaterials* (projekt iTARG3T) oraz subwencji badawczej AGH.

LITERATURA

- ALFONSO P., HAMID S.A., ANTICOI H., GARCIA-VALLES M., OLIVA J., TOMASA O., LOPEZ-MORO F.J., BASCOMPTA M., LLORENS T., CASTRO D., POLONIO F.G. 2020 – Liberation Characteristics of Ta-Sn Ores from Penouta, NW Spain. *Minerals*, 10 (6): 509.
- BGS, 2011 – Mineral profil, Niobum-Tantalum. British Geological Survey, London.
- BGS, 2015 – Risk List 2015. An Update to the Risk Index for Elements or Element Groups that Are of Economic Value. British Geol. Survey, London.
- BLEISCHWITZ R., DITTRICH M., PIERDICCA CH. 2012 – Coltan from Central Africa, international trade and implications for any certification. *Res. Policy*, 37: 19–29.
- BOLEWSKI A. (red.) 1994 – Encyklopedia surowców mineralnych Ś–Ż. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- CALLAGHAN R.M. 2021 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 164–165.
- CUNNINGHAM L.D. 2001 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 164–165.
- DERA, 2018 – Rohstoffrisikobewertung – Tantal. Deutsche Rohstoffagentur, Berlin.
- EC, 2017 – Tantalum. [W:] Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Executive summary. European Commission, Brussels: 470–485.
- EC, 2020 – Tantalum. [W:] Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). Critical Raw Materials Factsheets (Final). European Commission, Brussels: 735–752.
- FAN H.R., YANG K-F., HU F-F., LIU S., WANG K-Y. 2016 – The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: controversy and ore genesis. *Geoscience Frontiers*, 7: 335–344.
- GONZÁLEZ T.L., POLONIO F.G., LÓPEZ MORO F., FERNÁNDEZ A., CONTRERAS J., BENIT M.C. 2017 – Tin-tantalum-niobium mineralization in the Penouta deposit (NW Spain): Textural features and mineral chemistry to unravel the genesis and evolution of cassiterite and columbite group minerals in a peraluminous system. *Ore Geol. Rev.*, 81: 79–90. <https://europeanolithium.com/> <https://www.metalary.com/tantalum-price/> <https://www.usgs.gov/>
- MAGYAR M.J. 2006 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 168–169.



- MELCHER F., GRAUPNER T., HENJES-KUNST F., OBERTHÜR T., SITNIKOVA M., GÄBLER E., GERDES A., BRÄTZ H., DAVIS D., DEWAELE S. 2008 – Analytical Fingerprint of Columbite-Tantalite (Coltan). Mineralisation in Pegmatites – Focus on Africa. Ninth International Congress for Applied Mineralogy, 8–10 September 2008, Brisbane.
- ORRIS G.J., GRAUCH R. I. 2002 – Rare Earth Element mines, deposits, and occurrences. Open-File Report 02-189, USGS Publ., Washington.
- PADILLA A.J. 2020 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 164–165.
- PAPP J.F. 2011 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 162–163.
- PAPP J.F. 2016 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 166–167.
- PAULO A., STRZELSKA-SMAKOWSKA B. 1993 – Tantal. [W:] Paulo A. (red.), Materiały do ćwiczeń z nauki o złożach i geologii gospodarczej, część II: Rudy metali, t. I. Wyd. AGH, Kraków: 210–220.
- POLYAK D.E. 2018 – Tantalum. [W:] USGS Mineral Commodity Summaries. USGS Publ., Washington: 164–165.
- ROSKILL 2020 – Tantalum. Outlook to 2030, 16th Edition, London; www.roskill.com
- RUDNICK R.L., SALLY G. 2003 – Composition of the continental crust. *Treatise Geochem.*, 3: 1–64.
- SCHULZ K.J., PIATAK N.M., PAPP J.F. 2017 – Niobium and Tantalum. [W:] Schulz K.J., DeYoung J.H. Jr, Seal II R.R., Bradley D.C. (red.), Critical Mineral Resources of the United States – Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply, USGS, Reston: Chapter M.
- SIMANDL G.J., BURT R.O., TRUEMAN D.L., PARADIS S. 2018 – Economic Geology Models 2, Tantalum and Niobium: Deposits, Resources, Exploration Methods and Market – A Primer for Geoscientists, Geosciences, Canada, 45: 85–96.
- SKRZYPEK S.J. 2012 – Cyrkon, hafn, niob, wanad i tantal oraz ich stopy. [W:] Skrzypek S.J., Przybyłowicz K. (red.), Inżynieria metali i ich stopów. Wyd. AGH, Kraków: 487–506.
- STRATTON P. 2013 – Outlook for the global tantalum market. 2nd International Tin & Tantalum Seminar, 11th December 2013, New York.
- SZLUGAJ J., SMAKOWSKI T. 2015 – Tantal. [W:] Smakowski T., Galos K., Lewicka E. (red.), Bilans Gospodarki Surowcami Mineralnymi Polski i Świata. Państw. Inst. Geol.-PIB: 955–960.
- TIC, 2018 – Bulletin No. 172, 174. Tantalum-Niobium International Study Center, Brussels.
- TIC, 2019 – Bulletin No. 176. Tantalum-Niobium International Study Center, Brussels.
- TIC, 2020 – Bulletin No. 181. Tantalum-Niobium International Study Center, Brussels.
- TIC, 2021 – Bulletin No. 184. Tantalum-Niobium International Study Center, Brussels.
- USGS, 2013 – Metal Prices in the United States through 2010. Scientific Investigations Report 2012–5188, USGS Publ., Washington.
- WOŁKOWICZ S. 2013 – 24. Konferencja Afrykańskiego Towarzystwa Geologicznego Addis Abeba, Etiopia, 6–14.01.2013: międzynarodowa pomoc dla Afryki czy neokolonializm naukowy? *Prz. Geol.*, 61 (5): 290–293.

Praca wpłynęła do redakcji 19.02.2021 r.
Akceptowano do druku 23.03.2021 r.