

В. А. Гнатуш, канд. техн. наук, незалежний аналітик;
e-mail: vgnatush@gmail.com; ORCID 0000-0003-0772-686X

СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РИНКУ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ТА БРУХТУ БЕРИЛІЮ

Переробка відходів і брухту металів є важливим компонентом сучасної економіки, через те, що природні металеві ресурси є вичерпними. А так як метали, в тому числі і берилій, є основою людської цивілізації, то аналіз світового ринку вторинної переробки відходів і брухту берилію є актуальним в XXI столітті. Показано, що берилій використовується в багатьох галузях промисловості від автомобілебудування до супутників і ядерних реакторів. Впродовж 2011–2021 роки середньорічне виробництво берилію в світі становило 263 т. Найбільшими виробниками берилію в світі є США та Китай. В той же час в світі сформувався ринок відходів і брухту берилію. Основними експортерами цих товарів в 2020 році були Швейцарія (частка 38,9 %) та США (36,2 %), а імпортерами – Канада (39,7 %) і Австрія (38,1 %). За період з 2015 по 2020 рік США збільшили експорт відходів і брухту берилію з середньорічним темпом 61,4 % CAGR. В той же час найбільш динамічними імпортерами відходів і брухту берилію були Німеччина (CAGR 46,8 %) та ОАЕ (16,5 %). Звертається увага на екологічні аспекти переробки брухту, який містить берилій. Наразі результати обстеження персоналу свідчать про те, що переробка електронного брухту з використанням сучасних технологій забезпечує мінімальний ризик впливу берилію при диханні. Відзначається, що переробка електричного і електронного брухту потребує впровадження певного операційного менеджменту. Особливо це актуально для країн, що розвиваються. Показано, що для переробки електронного брухту використовуються процеси пірометалургії, гідрометалургії та біометалургії. Відзначається, що біометалургійна переробка електронних відходів має низькі експлуатаційні витрати, мінімальний об'єм хімічного і біологічного мулу та високу ефективність у детоксикації стоків порівняно з процесами піро- і гідрометалургії. Представлено інформацію стосовно виокремлення берилію з конструкцій ядерних реакторів шляхом використання електрохімічних, хімічних або термічних процесів.

Ключові слова: ринок, тенденції, берилій, відходи, брухт, екологія, менеджмент, технології.

Аналітика ринку вторинної переробки відходів та брухту берилію є важливою складовою наукових досліджень та розробок в секторі металургійної промисловості. Визначення факторів та тенденцій, що впливають на цей ринок, дозволяє корегувати напрямки наукових досліджень та інноваційних розробок, а також створення нового обладнання, проектування відповідних виробничих ділянок та цехів. Метою статті є проведення аналізу технічних, наукових і економічних статей та оглядів, а також статистичних даних стосовно тенденцій ринку вторинної переробки відходів та брухту берилію.

Світова промисловість використовує метал берилій доволі широко. Найбільшим джерелом видобування берилію є мінерал берил. Як свідчать дані US Geological Survey (USGS) впродовж 2014–2019 років видобуток берилу в світі коливався в діапазоні від 8,5 (2014) до 5,2 (2017) тис. т. В 2019 році 63,6 % його видобутку припало на США та 27,9 % – на Китай. Світові ресурси берилію оцінюються в понад 100 тис. т [1]. Впродовж 2011–2021 років середньорічне виробництво берилію в світі становило 263 т. Мінімальний обсяг зафіксовано в 2017 році – 210 т, а максимальний – в 2014 році – 337 т [2].

Європейський Союз. В країнах ЄС споживання рафінованого берилію, згідно аналітики Європейської Комісії, становить 37,5 тонн. В розрізі галузей частка його використання в електронному та телекомунікаційному обладнанні становить 42 %; в автомобільній електроніці – 17 %; в автомобільних компонентах – 17 %; в авіаційних компонентах – 10 %; в енергетиці – 8 %; в промислових формах та металевих

сплавах – по 3 %. Відзначається, що попит європейських споживачів вдовольняється за рахунок імпорту берилію з США (55 %), Казахстану (23 %), Японії (17 %) та Китаю (5 %) [3].

В той же час, як повідомляє аналітичний звіт Європейської Комісії від 2020 року, у світі не відомо про переробку виробів, про які містять берилій, після закінчення циклу споживання (Old scrap). Вважається, що рециклінг чистого металу берилію з брухту надзвичайно складний через малий вміст берилію (менше 40 ppm в приладі з найбільшою кількістю берилію). Тому берилій, що міститься у брухті виробів, потрапляє на звалища. Запаси, накопичені на звалищах в країнах Європейського Союзу за останні 20 років, містять приблизно 610 тонн берилію [3].

Відзначається [4], що переробка старого брухту (Old scrap), який містить берилій, може бути економічно вигідна для великої кількості матеріалів. До таких відносять деталі (прилади) військових літаків, космічних літальних апаратів і ядерних реакторів. Складність проте полягає в тому, що ці вироби мають довгий термін експлуатації.

Дещо інша ситуація з новим брухтом (New scrap), який містить берилій. Констатується, що в глобальному вимірі його переробляється від 94 % до 100 %. За підсумком 2013 року це становило від 100 до 135 тонн або близько 20 % світового попиту [3]. Практично весь новий брухт у вигляді шлаків і відходів виробничого процесу переплавляється в електричній печі. При цьому витрати енергії вдвічі менші, ніж при виробництві берилію з руди [4].

Сполучені Штати. В США, як повідомляє звіт USGS від 2022 року, споживання берилію оцінюється в 200 тонн загальною вартістю 120 млн. дол. США. При цьому 23 % продукції з берилію було використано для виготовлення промислових компонентів; 17 % – в аерокосмічній та оборонній галузях; 17 % – в автомобільній електроніці; 12 % – у побутовій електроніці; 11 % – у телекомунікаційних výroбах; 5 % – у енергетиці; 1 % – у напівпровідниках та 14 % у інших галузях. Повідомляється, що в країні для рециклінгу берилію використовують як новий брухт (New scrap), так і старий брухт (Old scrap) з оціночною ефективністю від 20 до 25 % загального споживання берилію [5].

До компаній, які переробляють новий брухт з вмістом берилію, відносять Monico Alloys і Materion Brush Inc. (США), а також NGK Berylco (Франція [3, 4].

Відзначається [6], що берилій високої чистоти (high purity beryllium) використовується в багатьох сучасних системах оборони США, а саме в інфрачервоних датчиках, радарх, приладах для ракет, супутників, військових літаків і гелікоптерів. Вироби, що містять берилій, застосовуються в низці програм Міністерства оборони США пов'язаних з метеорологією, супутниками тощо. Берилій є важливим компонентом ядерних реакторів і ядерних боеголовки. Констатується, що у жовтні 2000 року американська компанія Brush-Wellman Inc. законсервувала свою установку для відновлення берилію через ризики для здоров'я працівників. Для створення нового виробництва чистого берилію, здатного відповідати вимогам національної безпеки, розроблено Програму комплексного фінансування проекту. Узагальнений внутрішній попит в США на берилій високої чистоти в 2004 році становив 73500 фунтів. В перспективі попит на вказаний продукт буде зростати на 6 % щорічно. Тому нове виробництво берилію високої чистоти вочевидь повинно мати потужність 160000 фунтів на рік. Планувалось, що Brush-Wellman Inc. за підтримки Закону про оборонне виробництво (Defense Production Act, DPA) спроектує, збудує та буде експлуатувати установку в напівбезперервному режимі. Такий підхід забезпечив би попит галузей промисловості США на берилій високої чистоти [5].

Торівля. Світовий експорт відходів і брухту берилію (код HS 811213) в XXI столітті характеризується волатильністю. Так у вартісному вимірі світовий експорт вказаних товарів в 2002–2020 роках коливався від 1 тис. USD (2009) до 3989 тис. USD (2017) (рис. 1). В кількісному вимірі максимальна кількість експортованих відходів і брухту берилію відмічено в 2017 році – 19,3 тис. т.

Експортерами відходів і брухту берилію є невелика кількість країн. Якщо в 2015 році таких налічувалось 13 країн, то в 2020 році їх кількість зменшилась до восьми країн (табл. 1). До найкрупніших країн – експортерів слід віднести Швейцарію та США,

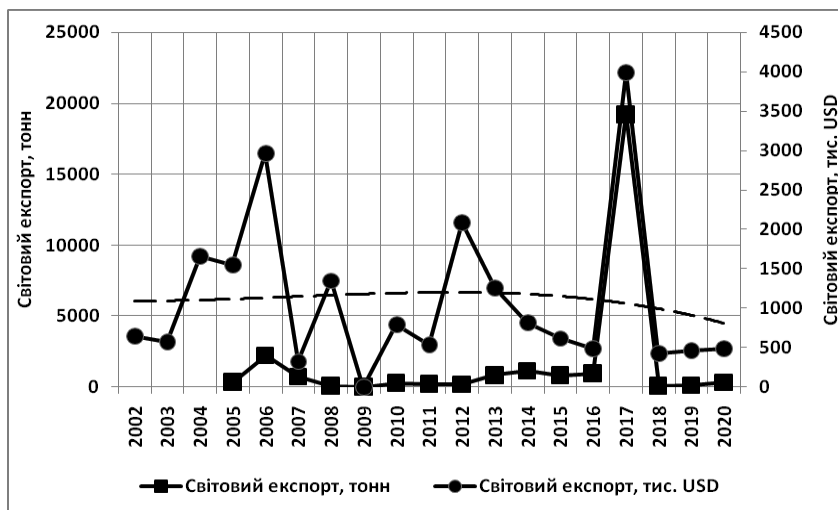


Рис. 1. Динаміка світового експорту відходів і брухту берилію [7]

загальна частка яких в вартісному вимірі у 2020 році склала 75,1 %. Хоча слід відзначити, що в 2015 році перші два місця рейтингу займали Швейцарія та Словаччина – разом 65,6 %. В цілому впродовж 2002–2020 років найбільш стабільними експортерами вказаних товарів були США (зафіксовано 89,5 % поставок в річному вимірі) та Швейцарія (63,2 %). Пік експорту у 2017 році обумовили поставки з Саудівської Аравії, які в вартісному вимірі склали 3413 дол. США або 85,6 % річного обсягу.

Слід відзначити, що перелік країн-імпортерів відходів і брухту берилію досить короткий. При цьому він доволі варіативний. До прикладу, якщо в 2015 році трійку лідерів формували Малайзія, США та Японія з загальною часткою 80,3 %, то в 2020 році аналогічні місця займали Канада, Австрія та Німеччина (84,7 %) (табл. 2).

При цьому у вказаний часовий проміжок найбільш динамічними імпортерами відходів і брухту берилію були Німеччина (CAGR 46,8 %) та ОАЕ (16,5 %). Вочевидь до цієї групи країн слід віднести Канаду та Австрію, які займають перші місця в Топ-2020. Зменшили закупівлю вказаних товарів США (CAGR – 42,1 %) та Японія (33,4 %).

Виходячи з торгівельної статистики слід відзначити, що світовий ринок відходів і брухту берилію характеризується обмеженою кількістю країн-гравців.

Екологічні аспекти переробки брухту берилію. Таким чином об'єктами для отримання берилію є, з одного боку, відходи мідних сплавів з вмістом берилію, а з другого, боку – брухт електронного та електричного обладнання.

Однак при переробці електронного брухту, який містить берилій, слід враховувати його токсичний вплив на людину. Вдихання пилу або випарів берилію або оксиду берилію можуть призвести до задишки, кашлю, болю у грудях, а також до летальних наслідків. Тривалий вплив малих концентрацій берилію може викликати хронічну хворобу берилію або бериліоз [8].

Відзначається [9], що найбільші ризики проникнення берилію в людський організм може мати місце у осіб, які живуть поблизу підприємств з виробництва берилію або місць зберігання відходів і брухту. Вміст берилію в повітрі поблизу цих об'єктів може перевищувати фоновий показник. Найбільш негативний вплив має інгаляційний шлях, під час якого берилій відкладається в легенях, а також накопичується в кістках і печінці. Основними негативними наслідками впливу берилію на здоров'я людини є респіраторні ефекти та рак легень. Наразі в США берилій був ідентифікований щонайменше у 540 із 1867 місць небезпечних відходів, які були запропоновані для включення до списку національних пріоритетів. Природними джерелами берилію є пил, вулканічні частки та атмосферні опади. За оцінками в навколишнє середовище з виробничих і переробних підприємств США в 2017 році виділилось 13,3 т берилію та 221,3 т сполук берилію [9].

Для уточнення екологічного впливу берилію в повітрі на працівників, які подрібню-

Таблиця 1
Рейтинги світових експортерів відходів і брухту берилію в 2015 і 2020 роках

	2015				2020				CAGR, %
	Тор - 2015	Країна- експортер	Вартість, тис. USD	Частка, %	Тор - 2020	Країна-експортер	Вартість, тис. USD	Частка, %	
1		Швейцарія	247	40,03	1	Швейцарія	190	38,85	-4,3
2		Словаччина	158	25,61	2	США	177	36,20	61,4
3		Велика Британія	137	22,20	3	Філіппіни	68	13,91	–
4		Намібія	19	3,08	4	Таїланд	27	5,52	37,5
5		Індонезія	18	2,92	5	Самоа	17	3,48	–
6		США	10	1,62	6	Канада	5	1,02	–
7		Катар	8	1,30	7	Боснія та Герцеговина	3	0,61	–
8		Сенегал	6	0,97	8	Норвегія	2	0,41	–
9		Таїланд	4	0,65	9	–	–	–	–
10		Мексика	4	0,65	10	–	–	–	–
		Разом	611	99,03	–	Разом	489	–	–
		Інші 3 країни	6	0,97	–	Інші країни	0	–	–
		Світ, всього	617	100,00	–	Світ, всього	489	100,00	-3,8

Примітка: вихідні дані від International Trade Centre. [7]; розрахунок автора

ють, сортують і виокремлюють метали та пластик з електронного брухту, проведено дослідження на сучасному переробному заводі у Великій Британії. На наступному етапі метали для подальшої переробки передаються на металургійне підприємство. Результати статистичної обробки даних свідчать про те, що переробка електронного брухту з використанням сучасних технологій забезпечує мінімальний ризик впливу берилію при диханні [10].

Менеджмент переробки брухту електронних компонентів. Важливим елементом ринку електронного брухту є менеджмент його переробки [11]. Відзначається, що він суттєво відрізняється в розвинених країнах від країн, що розвиваються. В розвинених країнах переробка електронного брухту включає операції з демонтажу. В подаль-

Рейтинги світових імпортерів відходів і брухту берилію в 2015 і 2020 роках

2015				2020				CAGR, %
Тор - 2015	Країна- імпортер	Вартість, тис. USD	Частка, %	Тор - 2020	Країна- імпортер	Вар- тість, тис. USD	Частка, %	
1	Малайзія	218	36,70	1	Канада	174	39,73	–
2	США	133	22,39	2	Австрія	167	38,13	–
3	Японія	126	21,21	3	Німеччина	30	6,85	46,8
4	Велика Британія	107	18,01	4	Бангладеш	17	3,88	–
5	Німеччина	3	0,51	5	Румунія	17	3,88	–
6	ОАЕ	2	0,34	6	Японія	11	2,51	-33,4
7	Франція	2	0,34	7	Саудівська Аравія	5	1,14	–
8	Гонконг	1	0,17	8	Італія	5	1,14	–
9	Швейцарія	1	0,17	9	ОАЕ	5	1,14	16,5
10	Таїланд	1	0,17	10	США	5	1,14	-42,1
	Разом	594	100,00		Разом	436	99,54	-5,0
	Інші країни	0	0,00		Інші країни	2	0,46	–
	Світ, сього	594	100,00		Світ, всього	438	100,00	-5,0

Примітка: вихідні дані від International Trade Centre, [7]; розрахунок автора

шому фракційний брукт відправляється на підприємства для плавлення, відкритого обпалу (open roasting), малосерійної плавки (small scale smelting), в кислотну ванну (acid bath) тощо. Причому кожна компанія зазвичай виконує один вид переробки і вони більш-менш рівномірно розміщені по території країни. В країнах, що розвиваються, відсутня організована система збирання, сортування та транспортування електронного брухту. Кінцеві методи переробки вказаного брухту функціонують в неорганізованому секторі відновлення різних металів [11].

Технологічні аспекти переробки брухту електронних компонентів.

Переробка брухту електронних компонентів є складним багатоопераційним технологічним процесом. Спочатку їх розбирають вручну, потім дроблять, проводять повітряну класифікацію, магнітну сепарацію, вібраційне просіювання тощо. В подальшому до виділеної металевої складової застосовують пірометалургію, гідрометалургію та електрохімію. Плавлення дробленої металевої шихти проводять в традиційних металургійних печах, залежно від можливостей підприємства. Для відновлення певних видів металів використовують рафінування. Гідрометалургійний метод дозволяє розділити металеві компоненти від неметалевих. Розроблено специфічні технології для відновлення цінних металів з металевої фракції [12].

Відзначається [13], що виокремлення металів з електронного брухту потребує 10–15 % енергії, необхідної для плавлення та рафінування традиційних концентратів.

Найпоширенішим технологічним процесом переробки електронних відходів є *пірометалургійна переробка*. В процесі плавлення в печі відновлюється вміст міді, а також таких металів як срібло, золото, платина і паладій. При цьому залізо та алюміній переходять до шлаку. Одним із варіантів є використання горизонтальної циліндричної печі (the Noranda Process). Після етапу плавлення отриманий штейн перетворюють в чорнову мідь. Остання рафінується в анодних печах, а отримані

аноди електрорафінуються до чистої міді. При цьому отримують такі метали як золото, срібло, селен і телур. В подальшому напівпродукт відправляється на завод з переробки дорогоцінних металів. В світі лідерами з виокремлення металів з електронних відходів з використанням плавлення та рафінування є чотири компанії: Boliden's Ronnskar (Швеція), Xstrata Copper's (Канада), Aurubis's Elektro-Recycling (Німеччина) і Umicore (Бельгія). Їх загальна потужність з переробки електронного брухту становить 290000 metric tons станом на 2012 рік. Середньої потужності заводи з переробки електронного брухту розташовані в Японії та Південній Кореї. В той же час пірометалургійна обробка не дозволяє повністю розділити всі метали і тому використовують в подальшому гідрометалургійні методи обробки [13].

Гідрометалургійна переробка електронних відходів більш точна, передбачувана та керована. Загалом цей вид переробки складається з таких етапів: 1 – механічна обробка для дроблення відходів; 2 – вилущування, де компонент виокремлюють з твердої речовини за допомогою розчинника (кислоти); 3 – розділення та очищення фільтрату для концентрації металів; 4 – вилучення дорогоцінних металів за допомогою електрорафінування, хімічного відновлення або кристалізації. Компанія Advanced Technology Materials Incorporated (ATMI) з Китаю розробила селективну хімічну речовину та процес переробки електронних плат, який дозволяє довести відновлення металів до 99 % і забезпечити їх чистоту на 99 % [13].

Біометалургійна переробка електронних відходів останніми роками набуває все більшого використання. Технологія базується на взаємодії мікробів з металами і включає сорбцію, відновлення, окислення та осадження сульфідів. Вони трансформовані в такі основні методи біометалургії металів, як біовилугування та біосорбція. Біовилугування застосовується для вилугування металевого концентрату з руд, особливо золота та міді. Біосорбція використовує водорості, бактерії, дріжджі та гриби для накопичення важких і дорогоцінних металів. Відзначається, що біометалургійна переробка електронних відходів має низькі експлуатаційні витрати, мінімальний об'єм хімічного/біологічного мулу та високу ефективність у детоксикації стоків [13].

Металургійна переробка брухту електронних компонентів, які крім берилію, містять і інші метали є комплексною технологічною операцією. В результаті плавки берилій може знаходитись як у вторинному металі, так і в шлаках. Останні з метою видалення берилію проходять хімічну обробку. Аналітики відзначають, що частка берилію в процесах переробки сплавів алюмінію та нікелю є невизначено. Аналогічно відсутні за станом на 2019 рік дані щодо кількості переробленого в Європейському Союзі берилію [14].

Переробка конструкцій та приладів ядерної техніки, які містять берилій, має певні особливості. Відзначається [15], що і в майбутніх термоядерних реакторах є висока вірогідність використання конструкцій з берилію. В процесі експлуатації вони отримують певну дозу опромінення. Для переробки таких виробів з метою подальшого використання берилію рекомендуються певні технології [15]. Виходячи з характеристик опроміненого термоядерним синтезом берилію пропонується три етапи його переробки: дитритизація (1), видалення радіонуклідів (2) і перероблення металевого берилію методами порошкової металургії (3). На другому етапі очищення використовуються такі методи, як вакуумна перегонка, зонна плавка та хлорування.

На першому етапі осаджену плівку, що містить тритій, можна видалити за допомогою внутрішньореакторних методів, включаючи використання імпульсів токамаку, можливо в поєднанні з іонним циклотронним резонансним нагріванням, очищення за допомогою лампи-спалаху, лазерною абляцією та експозицією плазмового факела. Основний тритій пропонується видалити високотемпературним відпалом [15].

На другому етапі провадять хлорування опроміненого берилію з відновленням хлориду берилію до високочистого берилію. При цьому використовують пропускання парів діхлориду берилію при зниженому тиску через нагрітий берилій або пропускання парів хлориду натрію через берилій. В подальшому хлорид берилію можна відновити з використанням електрохімічних, хімічних або термічних процесів [15].

Електрохімічне відновлення хлориду берилію реалізується в варіантах низькотемпературного та високотемпературного процесів.

Низькотемпературний процес полягає в електролізі суміші приблизно рівних частин хлориду берилію і хлориду натрію при температурі 370 °С в нікелевому контейнері, який служить катодом для електролізу. Видалений берилій відокремлюється від електроліту, а потім гаситься в крижаній воді. Отримані металеві пластівці послідовно промивають розведеними розчинами гідроксиду натрію та азотної кислоти і метанолом, а потім їх висушують [15].

Високотемпературний процес включає додавання 13–15 % берилію до суміші рівних частин хлориду натрію і калію, яка плавиться при 760–790 °С в металевому контейнері з графітовим анодом. Після завершення процесу суміш охолоджують, а пластівці берилію промивають розведеними розчинами гідроксиду натрію та азотної кислоти для видалення налиплих поверхневих оксидів [15].

Встановлено [15], що у випадку електрохімічного та хімічного відновлення хлориду берилію в металевий берилій містить доволі велику кількість домішок і тому він потребує подальшого очищення.

Термічне відновлення газоподібного хлориду берилію реалізується шляхом пропускання газу через нагріту нитку з карбідом кремнію. Недоліком технології є нестабільність процесу відновлення берилію [15].

Висновки

Берилій знаходить доволі широке застосування в багатьох галузях від автомобілебудування до оборонної промисловості. Він відноситься до категорії критичних матеріалів і тому його виробництво є актуальним завданням. В той же час сформувався світовий ринок брухту та відходів берилію, який доволі активно розвивається як в сегменті експорту, так і в сегменті імпорту. Наразі проблема переробки брухту берилію вирішена в промисловості. Проте виокремлення берилію з електронного брухту обумовлена певними складнощами внаслідок його невеликого вмісту в елементах приладів. В промисловості використовуються процеси пірометалургії та гідрометалургії для переробки електронного брухту. Перспективними в цьому сенсі є процеси біометалургії. Проте є потреба в розробці більш ефективних технологій виокремлення берилію з електронного брухту.

References

- 1 Beryllium Statistics and Information. National Minerals Information Center. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/beryllium-statistics-and-information/>.
- 2 Garside M. Production of beryllium worldwide from 2011 to 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/802034/production-of-beryllium-worldwide/>.
- 3 European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Factsheets on Critical Raw Materials. Luxembourg. 2020. 819P.
- 4 Lena Sundqvist Ökvist, Johan Eriksson and Xianfeng Hu. Production technologies of CRM from secondary resources. Swerea. January 2018. 186 p.
- 5 Mineral Commodity Summaries 2022. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2022. 202 p.
- 6 Krieg K. J. Determination under Section 303 (a) (5) of the Defense Production act for High Purity Beryllium Metal Production Program. 10.12.2005. URL: https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading%20Room/Other/Determination_of_the_Defense_Production%20Act_for_High_Purity_Beryllium_Metal_Production_Program.pdf/
- 7 International Trade Centre. URL: <http://intracen.org/>.
- 8 Recycling and disposal of electronic waste. Health hazards and environmental impacts. Swedish Environmental Protection Agency. Report 6417. March 2011. 137p. URL: <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/6400/978-91-620-6417-4.pdf>.
- 9 Toxicological Profile for Beryllium. Draft for Public Comment. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. January 2022. 298 p. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp4.pdf/>.

- 10 Theodore. L. Knudson, Huw Wilkins. An Evaluation of Airborne Beryllium Exposures during Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). February 7, 2013. 5p. URL: http://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Substance_Review/Substance_Profiles/last_contributions/20140404_5_BeSt_Be_Exposure_Assessment_WEEE_Recycling_2013.pdf/.
- 11 E-waste. Volume II: E-waste Management Manual. Compiled by United Nations Environmental Programme. Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre Osaka/Shiga. 2018. 128p. URL: <https://greene.gov.in/wp-content/uploads/2018/01/E-waste-Vol-II-E-waste-Management-Manual.pdf/>.
- 12 K. K. Sahu and A. Agrawal Processing of Electronic Waste (e-waste). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/297714734.pdf/>.
- 13 Jennifer Namias. THE FUTURE OF ELECTRONIC WASTE RECYCLING IN THE UNITED STATES: Obstacles and Domestic Solutions. Columbia University. 2013. 66 P. URL: https://gwcouncil.org/wp-content/uploads/2020/10/Namias_Thesis_07-08-13.pdf/.
- 14 ROHS Annex II Dossier for Beryllium and its compounds. Restriction proposal for substances in electrical and electronic equipment under RoHS. Report No. 5. Version 2. Oeko – Institut e.V. 25.09.2019. 48p. URL: https://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Pack_15/4th_Consultation/Beryllium_and_compounds_RoHS_Dossier_v2_final_20190925.pdf/.
- 15 F. Druyts, K. Dylst, J. Braet, "Beryllium recycling: feasibility and challenges," Proceedings of the 8th IEA International Workshop on Beryllium Technology, December 5-7, 2007, Lisbon, Portugal. URL: http://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/100/40100146.pdf/.

Received 14.09.2022

V. A. Gnatush, PhD (Engin.), Independent Analyst; e-mail: vgnatus@gmail.com;
ORCID: 0000-0003-0772-686x

GLOBAL TRENDS IN THE BERYLLIUM WASTE AND SCRAP RECYCLING MARKET

Waste and scrap metal processing is an important component of the modern economy, as natural metal resources are exhaustible. And since metals, including beryllium, are the basis of human civilization, the analysis of the global market for secondary processing of waste and beryllium scrap is relevant in the 21st century. Beryllium has been shown to be used in many industries from automobiles to satellites and nuclear reactors. During 2011–2021, the average annual production of beryllium in the world was 263 tons. The largest producers of beryllium in the world are the USA and China. At the same time, a market for beryllium waste and scrap was formed in the world. The main exporters of these goods in 2020 were Switzerland (38.9 % share) and the USA (36.2 %), and the importers were Canada (39.7 %) and Austria (38.1 %). Between 2015 and 2020, US exports of beryllium waste and scrap increased at a CAGR of 61.4 %. At the same time, the most dynamic importers of beryllium waste and scrap were Germany (CAGR 46.8 %) and the UAE (16.5 %). Attention is drawn to the environmental aspects of the processing of scrap containing beryllium. Currently, the results of the personnel survey indicate that the processing of electronic scrap using modern technologies ensures a minimal risk of exposure to beryllium when breathing. It is noted that the processing of electrical and electronic scrap requires the implementation of a certain operational management. This is especially relevant for developing countries. It is shown that the processes of pyrometallurgy, hydrometallurgy and biometallurgy are used for the processing of electronic scrap. It is noted that biometallurgical processing of electronic waste has low operating costs, minimal volume of chemical and biological sludge, and high efficiency in wastewater detoxification compared to pyro- and hydrometallurgy processes. Information is presented on the separation of beryllium from nuclear reactor structures by using electrochemical, chemical, or thermal processes.

Keywords: market, trends, beryllium, waste, scrap, ecology, management, technologies.