УДК 669.71:669.04/338.4

В. А. Гнатуш, *канд. техн. наук, незалежний аналітик,*
e-mail: vgnatush@gmail.com,https://orcid.org/0000-0003-0772-686X

СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ РИНКУ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ТА БРУХТУ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Представлено аналіз світового ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів. Аналіз даних дає можливість створити прогноз, який вказує на те, що до 2040 р. частка вторинних алюмінієвих сплавів сягне майже 80 % загального виробництва алюмінію в світі. Показано, що за період з 2001 по 2019 роки світовий експорт алюмінієвого брухту збільшився в 2,7 рази в кількісному вимірі та в 3,6 рази в вартісному вимірі. Лідерами світового експортного ринку алюмінієвого брухту у 2019 році являються США (частка 18,5 %) і Німеччина (10,4 %). За період з 2015 по 2019 роки найбільш динамічними експортерами брухту алюмінію є Японія (ріст в 1,9 рази), Мексика (в 1,7 рази), Бельгія (в 1,3 рази) та США (в 1,2 рази). Найбільшими імпортерами алюмінієвого брухту в світі в 2019 році були Китай (частка 13,7 %) та Індія (13,4 %). Описано аналіз структури відходів і брухту алюмінію в Україні за 2018 рік. Виходячи з товарної структури утворення алюмінієвих відходів та брухту в світі, сформувались відповідні технології переробки вторинної сировини та створено обладнання для її здійснення. Розглянуто розроблені та використовувані технології переробки неметалевих алюмінієвих відходів (шлаків, дросів), як в сольовому, так і безсольовому варіантах. Надано також інформацію стосовно технологій та конструкцій печей для переробки алюмінієвого брухту. Показані позитивні та негативні показники їх експлуатації. Відзначається перспективність використання нахилених роторних печей для масштабної переробки/переплавки алюмінієвого брухту. Звертається увага на необхідність підготовки в Україні спеціалістів з переробки/рециклінгу металевого брухту та відходів, які містять алюміній.

Ключові слова: *ринок, алюмінієві вторинні сплави, відходи, брухт, шлаки, технології, тенденції, виробництво, плавильні печі.*

Аналітика ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів є невід'ємним елементом наукових досліджень в секторі металургійної промисловості. Визначення факторів та тенденцій, що впливають на цей ринок, дозволяє корегувати напрямки наукових досліджень, інноваційних розробок, а також конструювання і випуск нового обладнання, проектування відповідних дільниць та цехів. Викладачі університетів і керівники виробництв, знайомлячись з цією тематикою, звернуть увагу на перспективні напрями, формуючи розуміння щодо конкурентоздатних технологій, характеристик металопродукції та спрямування зусиль для підвищення кваліфікації персоналу та інженерних кадрів.

Проблематика ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів як світу, так і окремих країн знайшла своє відображення в роботах Stefano Capuzz, F. Passarini (Італія); Michel G. Drouet (Канада); Necip Unlu (Туркччина); Н. М. Барбин, В. Г. Радченко, И. Ф. Селянин (РФ); Ф. М. Верховлюк, Т. М. Нестеренко (Україна) та інших.

Метою статті є проведення аналізу статистичних даних, технічних, наукових і економічних статей та оглядів стосовно тенденцій ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів.

Світова промисловість переробки (рециклінгу) відходів та брухту алюмінію займає важливе місце на світовому ринку металів. Це обумовлено тим, що алюміній та його сплави знаходять все більше застосування в автомобілебудуванні, будівництві будинків, виготовленні упаковки тощо. За період з 2001 по 2019 р. виробництво первинного алюмінію в світі збільшилось в 2,6 рази і сягнуло 63,7 млн т [1].

До факторів, що обумовлюють підвищення попиту на вироби з алюмінію, слід віднести їх міцність, легкість, довговічність, економічну утилізацію (рециклінг). Очікується, що до 2040 р. світовий попит на алюміній досягне 90 млн т. При цьому за рахунок переробки брухту алюмінію буде виготовлятись 70 млн т вторинних алюмінієвих сплавів [2].

Рециклінг відходів та брухту алюмінію дозволяє економити 95 % енергії у порівнянні з виробництвом первинного алюмінію, а одна тонна вторинного алюмінію економить до 8 т бокситу та 14000 кВт·год. електроенергії. В країнах ЄС вироби з алюмінію знаходять застосування на транспорті (42 %), в будівництві (23 %), як пакувальний матеріал (17 %), в технологічному обладнанні (12 %) та в споживчих товарах тривалого використання (6 %). Разом в 2017 р. в ЄС було перероблено 4,9 млн т алюмінію. Відзначається, що коефіцієнт утилізації алюмінієвого брухту по закінченню експлуатації виробів (end-of-life, EoL) з алюмінію (Old Scrap) становить 69 % [3].

При цьому в ЄС-28 збір та сортування брухту алюмінію (Old scrap) в 2013 р., а саме будівельних конструкцій становив 95 %, засобів транспорту – 92 %, промислового обладнання – 80 %, енергетичного обладнання – 70 %, пакувальних матеріалів – 59 %, товарів тривалого використання – 50 %, та решта виробів – 30 % [4].

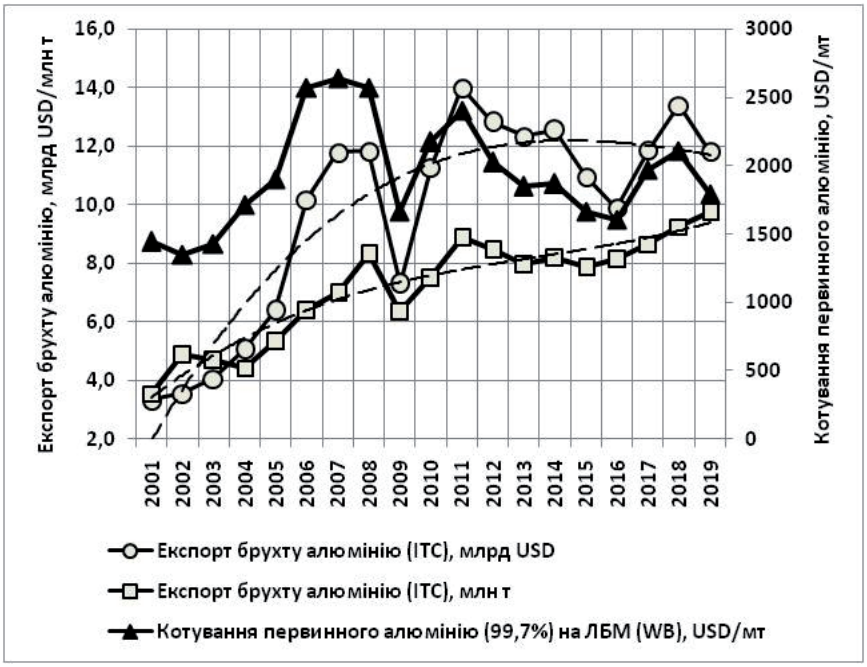
В США за період з 2001 по 2018 р. виплавка вторинних алюмінієвих сплавів з брухту та відходів збільшилось з 2970 тис. т до 3700 тис. т або в 1,2 рази. При цьому частка сплавів з використання старого скрапу (брухт готових виробів або Old scrap) коливалась від 40,7 % (2001 р.) до 43,2 % (2018 р.). Слід відзначити, що в 2018 р. виплавка вторинних алюмінієвих сплавів з брухту (Old scrap) склала 1600 тис. т, а з відходів виробництва (New scrap) – 2100 тис. т. В результаті виробництво первинного алюмінію в країні за період з 2001 по 2018 р. зменшилось з 2637 тис. т до 890 тис. т або майже в три рази [5].

В Індії на вторинні алюмінієві сплави припадає 30 % (1,1 млн т) загального споживання алюмінію в країні, що становить 3,3 млн т (2015–16 фінансові роки, далі ф. р.). За попередні шість років попит на вторинні алюмінієві сплави збільшився в 1,8 рази. Очікується, що в 2020–21 ф. р. він сягне 1,6 млн т або 33 % загального споживання алюмінію в Індії. Попит на вторинний алюміній на 90 % вдовольняється за рахунок імпорту брухту алюмінію. У 2016 році в Індії було перероблено близько 120 тис. т алюмінієвого брухту, причому автомобільний та енергетичний сегменти складають 75 % від загальної кількості. Коефіцієнт переробки старого брухту (Old scrap) в Індії коливається від 20 % (упаковка, фольга) до 80 % (автомобілі, літаки). Економічний блок уряду Індії реалізує регуляторні ініціативи щодо активізації переробки брухту, включаючи рециклінг автомобілів [6].

Актуальність рециклінгу товарів, що вироблені з алюмінієвих сплавів і завершили свій життєвий цикл, чітко спостерігається на прикладі авіаційної техніки. Відмічається [7], що в світі за період з 1990 по 1999 р. щорічно в середньому списувалось 170 комерційних літаків. В наступне десятиліття їх кількість збільшилась до 400, а за прогнозами до 2023 р. кількість описуваних літаків сягне 750 одиниць щорічно. За прогнозом компанії Airbus впродовж 2009–2028 рр. буде списано в світі до 8453 літаків. По завершенню терміну експлуатації літак розбирають. Частина деталей передається на повторну експлуатацію, а корпус і решта деталей переплавляють і отримують кольорові метали (більше 70 %) і чорні метали (25 %). При утилізації літака середнього класу 60…70 % його ваги становлять деталі з алюмінієвих спла-

вів, 10...15 % – з сталей і 10 % – з композиційних матеріалів, титану та благородних металів. Слід відзначити, що в західних країнах утилізація літаків поставлена на міцний техніко-бізнесовий фундамент. В 2006 р. створено Асоціацію з переробки повітряного флоту (Aircraft Fleet Recycling Association, AFRA), до якої входять провідні європейські та американські авіабудівні компанії. Розташована в Франції Асоціація працює над тим, аби рециклінг літальних апаратів був екологічно безпечним і економічно вигідним [7].

Торгівля. Світовий експорт алюмінієвого брухту (код ГС 7602) незважаючи на локальні кризи світової економіки розвивається достатньо динамічно. Так, за період з 2001 по 2019 рр. обсяг світового експорту даного товару в кількісному вимірі збільшився з 3,6 до 9,8 млн т або в 2,7 рази (рисунок). При цьому у вартісному вимірі світовий експорт алюмінієвого брухту в 2019 р. становив 11,8 млрд USD проти 3,3 млрд USD у 2001 р. (ріст в 3,6 рази).



Динаміка світового експорту брухту алюмінію та котувань первинного алюмінію на Лондонській біржі металів [8, 9]

Хоча слід відзначити, що експортні ціни на брухт алюмінієвий знаходяться під тиском котуваннь первинного алюмінію (99,7 % Al) на Лондонській біржі металів (London Metal Exchange, LME), що в свою чергу визначаються кон'юнктурою світового ринку первинного алюмінію. Оцінка річних коливань вартості експорту алюмінієвого брухту і котувань алюмінію на ЛМБ свідчить про достатньо тісний зв'язок між ними: коефіцієнт кореляції становить 0,66.

Світовий ринок брухту алюмінію формують майже 180 країн та територій. Проте лідируюча десятка країн-*експортерів* доволі стабільна і їх частка в кількісному вимірі склала 65,5 % в 2015 р. і 61,0 % в 2019 р. (табл. 1). Найбільшими експортерами фактично є дві країни – США і Німеччина, сукупна частка яких становила 32,6 (2015 р.) та 28,9 % (2019 р.).

За період з 2015 по 2019 рр. найбільш динамічними експортерами брухту алюмінію є Японія (ріст в 1,9 рази), Мексика (в 1,7 рази), Бельгія (в 1,3 рази) та США (в 1,2 рази). В цілому за звітний період експорт брухту алюмінію в світі збільшився з 7,9 до 9,8 млн т або в 1,2 рази (табл. 1). Українські компанії доволі пасивні в експорті брухту алюмінію і тому країна в світовому рейтингу займає місце в другій сотні (табл. 1). Якщо в 2015 р.

Таблиця 1

Рейтинги світових експортерів брухту алюмінію в 2015 і 2019 рр.

	2015			2019				
Топ у 2015	Країна - експортер	Кількість, тис. т	Частка, %	Топ у 2019	Країна - експортер	Кількість, тис. т	Частка, %	2019 до 2015, %
1	США	1497,4	19,07	1	США	1808,7	18,52	120,8
2	Німеччина	1064,3	13,55	2	Німеччина	1014,0	10,38	95,3
3	Канада	500,9	6,38	3	Канада	555,4	5,69	110,9
4	Франція	450,9	5,74	4	Франція	521,8	5,34	115,7
5	Сполучене Королівство	406,1	5,17	5	Сполучене Королівство	477,5	4,89	117,6
6	Нідерланди	340,0	4,33	6	Бельгія	366,1	3,75	129,0
7	Бельгія	283,7	3,61	7	Нідерланди	362,6	3,71	106,7
8	Австралія	261,3	3,33	8	Австралія	300,6	3,08	115,0
9	Польща	179,9	2,29	9	Японія	278,7	2,85	185,7
10	Саудівська Аравія	156,8	2,00	10	Мексика	274,1	2,81	175,6
	Разом	5141,2	65,48		Разом	5959,4	61,02	115,9
	Решта 157 країн	2710,9	34,52		Решта 177 країн	3806,2	38,98	140,4
	Всього	7852,1	100,00		Всього	9765,6	100,00	124,4
113	Україна	0,554		168	Україна	0,099		17,9

Примітка : вихідні дані від International Trade Centre [8]; розрахунок автора

Україна експортувала 0,6 тис. т брухту алюмінію, то в 2019 р. – тільки 0,1 тис. т. В той час, як сусідка України Польща в 2015 р. експортувала 179,9 тис. т брухту алюмінію (9 місце рейтингу), а в 2019 р. – 258,3 тис. т (11 місце), тобто збільшила поставки в 1,4 рази.

Наразі серед імпортерів брухту алюмінієвого в 2015 и 2019 рр. чільні позиції займають Китай і Індія, сукупна частка яких в світовому імпорті становить 33,7 % (2015 р.) та 27 % (2019 р.) (табл. 2).

Слід відзначити, що впродовж 2015–2019 рр. частка чільної десятки країн, імпортерів брухту алюмінію, зменшилась в кількісному вимірі з 74,2 до 69,2 % при збільшенні обсягу імпорту на 7,6 %. В той же час решта країн – імпортерів наростила закупки на 37,6 %. Україна звітного періоду збільшила імпорт брухту алюмінію в 36,9 раз, хоча у порівнянні з Польщею українські масштаби імпорту не виглядають вельми

Таблиця 2

Рейтинги світових імпортерів брухту алюмінію в 2015 і 2019 рр.

2015				2019				2019 до 2015, %
Топ у 2015	Країна - імпортер	Кількість, тис. т	Частка, %	Топ у 2019	Країна - імпортер	Кількість, тис. т	Частка, %	
1	Китай	2087,0	23,65	1	Китай	1395,5	13,71	66,9
2	Індія	882,9	10,00	2	Індія	1350,7	13,27	153,0
3	Німеччина	790,1	8,95	3	Німеччина	968,0	9,51	122,5
4	Республіка Корея	746,0	8,45	4	Республіка Корея	885,9	8,70	118,8
5	Італія	520,4	5,90	5	Італія	664,2	6,53	127,6
6	США	509,8	5,78	6	США	568,3	5,58	111,5
7	Австрія	284,1	3,22	7	Малайзія	384,0	3,77	409,6
8	Бельгія	247,3	2,80	8	Австрія	303,8	2,98	106,9
9	Франція	243,5	2,76	9	Бельгія	271,3	2,67	109,7
10	Польща	239,0	2,71	10	Франція	254,4	2,50	104,5
	Разом	6550,0	74,21		Разом	7046,1	69,23	107,6
	Решта 116 країн	2275,8	25,79		Решта 104 країни	3132,0	30,77	137,6
	Всього	8825,8	100,00		Всього	10178,1	100,00	115,3

Примітка: вихідні дані від International Trade Centre, [8]; розрахунок автора

вражаючими. У 2019 р. Польща імпортувала 222, 5 тис. т брухту алюмінію (13 місце світового рейтингу), а Україна – майже 3 тис. т (50 місце світового рейтингу) (табл. 2).

В технічному плані застосування технологій переробки відходів і брухту алюмінію визначається їх структурою збору в межах країни і структурою імпорту з інших країн.

Структура відходів і брухту алюмінію в Україні. Відповідно до Класифікатора відходів ДК 005-96 відходи та брухт алюмінію утворюють два класифікаційних угрупування: код 2732.2 «Відходи виробничо-технологічні алюмінію, сплавів алюмінієвих та прокату алюмінієвого» і код 2732.3 «Відходи кінцевої продукції виробництва алюмінію, сплавів алюмінієвих та прокату алюмінієвого». В свою чергу перше класифікаційне угрупування містить 21 товарну позицію, а друге – п'ять товарних позицій.

Таблиця 3

Структура утворення та утилізації відходів алюмінієвого виробництва в Україні 2018 р.

Найменування	код ДК 005-96	Утворено відходів		Утилізовано відходів	
		тонн	%	тонн	%
Шлак первинного плавлення алюмінію (білий дрос), що утворюється при першому плавленні	2732.2.9.01	830,894	0,04	–	–
Пудра алюмінієва, що утворюється у процесах металургії алюмінію (перше плавлення)	2732.2.9.02	0,2	0,00	–	–
Шлак знятий, що утворюється у процесах металургії алюмінію (перше плавлення)	2732.2.9.05	254,967	0,01	0,165	0,07
Шлак соляний вторинного плавлення, що утворюється у процесах металургії алюмінію	2732.2.9.06	299,703	0,02	–	–
Відходи очищення газу тверді, що утворюються у процесах металургії алюмінію	2732.2.9.09	0,6	0,00	–	–
Зола та залишки інші, що утворюються у процесах металургії алюмінію	2732.2.9.11	418,257	0,02	218,393	52,22
Шлами червоні, які утворюються при глиноземному виробництві алюмінію	2732.2.9.14	1929401	99,91	–	–
Разом суміш метал–неметал, тонн		1931205,621	100,00	218,558	0,01
Брухт та відходи алюмінію та його сплавів кускові, що утворюються при виробництві прокату алюмінієвого	2732.2.9.19	35,911	31,52	4,928	13,72
Напівфабрикати,прокат власного виробництва з алюмінію та його сплавів, які не придатні для використання за призначенням	2732.2.9.21	12,452	10,93	–	–
Прокат алюмінієвий некондиційний	2732.3.1.01	8,59	7,54	–	–
Брухт прокату алюмінієвого	2732.3.1.02	0,653	0,57	–	–
Алюміній, сплави алюмінієві та прокат алюмінієвий, забруднені радіонуклідами та (або) шкідливими (небезпечними) речовинами	2732.3.2.01	56,329	49,44	–	–
Разом металеві відходи, тонн	_	113,935	100,00	4,928	13,72

Примітка: вихідні дані від Держстату України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/ [10]; розрахунки автора.

В той же час, якщо виходити з аналізу структури утворення відходів алюмінієвого виробництва від Держстату України за 2018 р., то в координатах неметал – метал реальне утворення відходів можна поділити на дві групи: відходи у вигляді суміші метал–неметал та металеві відходи (табл. 3).

Таким чином наведена вище номенклатура відходів алюмінієвого виробництва в Україні (табл. 3) формує відповідні вимоги до технології, що застосовуються або розробляються з метою підвищення ефективності переробки (рециклінгу) відходів та брухту алюмінію.

Технологічні аспекти переробки відходів алюмінієвих в системі метал-неметал. Як відзначається в дослідженні [11], джерелами утворення алюмінієвих шлаків є наступні:

- при виробництві первинного алюмінію утворюються «збори», які у вигляді пінки що містять менше 45 % Al, або як дроси – більше 45 % Al;
- при виробництві вторинних алюмінієвих сплавів з застосуванням рафінуючих соляних флюсів;
- при безфлюсовій плавці алюмінієвих сплавів в ливарних цехах утворюються шлаки/збори, які містять від 20 до 80 % Al.

В той же час відмічається, що алюмінієві шлаки можуть бути порошкоподібні (містять від 10 до 20 % Al) та грудковаті (містять від 45 до 80 % Al) [12].

Для переробки алюмінієвих шлаків в світі використовується гамма металургійних технологій (табл. 4).

Традиційно в XX ст. переробку алюмінієвого шлаку (дросу) проводили в обертовій соляній печі (rotary salt furnace, RSF або RSF – process) з газовим або нафтовим пальником. При цьому в піч присаджували до 50 % від маси дросу соляний флюс. Проте недоліком цієї технології є продукування соляного кеку, що містить оксиди

Таблиця 4

Технології переробки алюмінієвих шлаків

Технологічний процес	Найменування технології	Основні характеристики, переваги, недоліки	Джерело
Переробка гарячих шлаків	центрифугування (процес ECOCENT)	передбачає економічне та екологічне видалення алюмінію шляхом центрифугування гарячого шлаку; робочий цикл продовжується 40 хв., а частка видаленого алюмінію становить більше 90 %; розроблено компанією FOCON, Австрія.	[14]
	пресування (процес TARDIS)	видалення алюмінію з гарячого дросу пресуванням; розроблено компанією ALTEK, Велика Британія	[15]
Переробка холодних шлаків	содова технологія	п'ятиетапний процес, що включає: 1 – сплавляння оксиду алюмінію з карбонатом натрію, 2 – теплова обробка в автоклаві, 3 – прожарювання гідрооксиду алюмінію, 4 – електроліз глинозему, 5 – рафінування алюмінію хлором; перевагу вбачають в зв'язуванні алюмінію в алюмінат натрію; недоліком технології є виділення оксиду вуглецю.	[16]

Первинна переробка алюмінієвих шлаків включає такі технологічні процеси, як: ручне сортування, охолодження, перемішування, вібраційний грохот, роторне охолодження, охолодження інертним газом (Inert Gas Dross Cooling, IGDC) [13].

та нітриди алюмінію, алюміній та солі в кількості більше 1 т на 1 т переробленого дросу. В результаті створюються певні екологічні проблеми для середовища. З метою вирішення цієї проблеми в світі почали розробляти технології безсольової переробки алюмінієвого дросу. В Канаді в 1987 р. Hydro-Quebec Research Center (Hydro-Québec's research institute) виконав роботу по заміні в обертовій соляній печі традиційне джерело нагріву на плазмовий пальник, що працював на азоті або повітрі (патент США 4960460 від 1990 р.). Робоча температура печі становила 700…800 ^{0}C. Впродовж дев'яти років роторна піч з плазмовим пальником експлуатувалась в Alcan Treatment Center, м. Жонкьєр, Канада [17, 18].

Hydro-Quebec Research Center, Канада, розробив і запатентував технологію DROSCAR для переробки алюмінієвого шлаку без використання сольових флюсів. Вона базується на роторній похилій печі, але в якості джерела нагріву використовується електрична дуга постійного струму між двома графітовими електродами (роторна дугова піч). Для запобігання окислення алюмінію плавка проводиться в середовищі аргону [17, 18].

ALUREC process розроблено німецькими компаніями. В основі технології – роторна похила піч, нагрівання шихти в якій забезпечується киснево-паливним пальником. Одночасно для мінімізації окислення відновлюваного металу (алюмінію) контролюється пічна атмосфера. Відзначається висока енергоефективність конструкції печі [17, 18].

Безсольовий DROSRITE process від PyroGenesis Canada Inc. передбачає завантаження гарячого дросу в футеровану роторну піч з аргоновою атмосферою, яка обертається протягом 15…30 хв. Потім алюміній зливається в ківш, а в піч вприскується доза кисню. В результаті спалюється частина дросу, а коли температура в печі досягне 800…900 ^{0}C, подача кисню припиняється. Перед зливанням залишків дросу піч знову промивається аргоном [17].

Печі DROSRITE™ PyroGenesis здатні підвищити ефективність відновлення металів з відходів. При цьому не виробляються небезпечні побічні продукти, при одночасному зменшенні експлуатаційних витрат. Система Mini-DROSRITE ™ може економічно переробляти впродовж року 500 т дросу порівняно з 3000–7500 т, що забезпечують інші більш потужні системи компанії [19].

Плазмова обробка алюмінієвого дросу вважається перспективною технологією серед інших запропонованих процесів безсольової обробки. За станом на 2015 р. функціонує два плазмових заводи з переробки алюмінієвого дросу: завод Alcan у Канаді та завод Plasma Processing Corp. у США. Вони характеризуються такими показниками: потужність плавлення коливається від 0,5 до 0,7 т/год.; процес каталізується солями; температура плавлення становить 700…750 ^{0}C; викиди парникових газів сягають норми в діапазоні до 1000 ^{0}C; печі енергетично затратні; вихід сольового шлаку сягає 500 кг [20].

Розроблена [11] експериментальна електротермічна установка для переробки алюмінієвих шлаків складається з плавильної накопичувальної печі та електродугової вакуумної камери однофазного змінного струму. Остання оснащена системою дозованої подачі подрібненого алюмінієвого шлаку. Відмічається, що дана технологія характеризується високою ефективністю відновлення алюмінію з шлаку, а також великою продуктивністю процесу. Хоча відсутня інформація стосовно технічних характеристик даної установки та її промислового випробування.

Компанія METALLURG ENGINEERING OÜ (Таллінн, Естонія) розробляє та просуває технологію електрошлакового переплаву алюмінієвих шлаків/дросу або Alucyc–процес. Метод дозволяє вилучити з шлаку більше 95 % алюмінію. При цьому зменшується екологічне навантаження на навколишнє середовище. Для переробки використовували алюмінієвий шлак з вмістом 15…85 % Al_2O_3 з присадкою кріоліту (Na_3AlF_6). Для оцінки ефективності технології використано піч потужністю 600 кВт, ємністю тигля 0,5 куб. м, що забезпечує переробку 8000 т шлаку/рік і виробництво 4000 т алюмінію на рік. Розраховано, що виходячи з умов виробництва алюмінієвого шлаку в Китаї та

Західній Європі застосування Alucyc–процесу є економічно доцільним, термін окупності складає до чотирьох років, виходячи з біржових цін на алюміній в 2014 р. [20].

Розроблену співробітниками Алтайського ДТУ технологію переплаву алюмінієвих шлаків в однофазній електродуговій печі змінного струму А–550МУ конструкції ІЕЗ ім. Є. О. Патона впроваджено на ЗАТ «Завод алюминиевого литья» (м. Барнаул, РФ) в 2001 р. Вказана технологія забезпечує, при переплаві бідних алюмінієм «чорних» шлаків, вихід придатного 30…35 %, а у випадку багатих алюмінієм «білих» шлаків – 45…50 %. Залишковий вміст алюмінію в шлаках після переплаву становив 1,5…2 %, а енерговитрати – 1,5…2,0 кВт·ч/кг. В умовах даного підприємства технологія дозволяє отримувати до 100…150 т вторинних алюмінієвих сплавів на рік [21].

Алюмінієвий дрос можливо використовувати як добавку до бетону. Оцінка механічних властивостей показала, що застосування таких відходів, як наповнювача в бетон, призводить до підвищення міцності на згин на 40 % та міцності на стиск на 15 % у порівнянні з характеристиками бетону з цементом [22].

Технологічні аспекти переробки алюмінієвого брухту. В світі розроблено та використовують доволі широко лінійку плавильних печей для виробництва вторинних алюмінієвих сплавів з брухту. Однак при виборі типу плавильної печі слід керуватись такими показниками, як вмістом металу (алюмінію) в брухті, типом і вмістом домішок, геометрією брухту, варіаціями хімічного складу брухту, вартістю енергії, обсягом виробництва і бажаними характеристиками кінцевого продукту [23].

Виходячи з енергоефективності слід відзначити, що в США 95 % алюмінієвого брухту плавлять в газових відбивних (реверберацiйних) печах, хоча вони більше енергоезатратні, проте менш капіталоємкі і простіші в експлуатації, ніж ротаційні печі. Наразі в Європі, де вартість енергії досить висока, перевагу надають ротаційним печам, як більш енергоефертивним (табл. 5), [23].

Таблиця 5

Узагальнені характеристики печей переробки алюмінієвого брухту [23]

Найменування обладнання	Джерело енергії		Сфера застосування
	електрика	газ	
Тигельні печі (Crucible Furnace)	+	+	внутрішній брухт
Відбивні печі (Reverberatory Furnace)	–	+	масовий брухт
Ротаційні печі (Rotary Furnace)	–	+	масовий брухт
Втрати металу, %	0,5...3	5...8	–
Енергоефективність, %	90 (індукційні печі), 83 % (печі опору)	15...28 (тиглі газові)	–

Сучасна промисловість вторинної переробки (переплавки) металевого брухту використовує таке пічне обладнання: відбивні (реверберацiйні) печі як ливарні та плавильні для чистого брухту з невеликою питомою поверхнею; ротаційні барабанні соляні печі для обробки забрудненого брухту з великою питомою поверхнею; двокамерні стаціонарні печі для брухту, забрудненого лише органікою. Стаціонарна ротаційна барабанна піч поступово замінюється нахиленою обертовою барабанною пічкою через кращі робочі параметри останньої. В деяких випадках використовують топкові та індукційні печі [24].

Відзначається [25], що в сучасних відбивних печах створюються умови для більш ефективного спалювання палива і зменшення втрат металу. Останнє досягається за рахунок завантаження твердої шихти в ванну з розплавом, а також примусовою циркуляцією розплаву (газодинамічні імпульсні насоси, низькочастотні електромагнітні перемешувачі, електромагнітні насоси).

Крім того, використання гарячих відхідних газів для попереднього нагрівання завантаженої шихти, покращує енергоефективність відбивної печі від 40 до 50 % [23] .

Прикладом такої плавильної печі є багатокамерна відбивна піч Hertwich Ecomelt від компаніїї Hertwich Engineering GmbH з Австрії [26]. Вона призначена для переробки алюмінієвого брухту з домішками фарби та пластиків. Конструктивно передбачено автоматичне завантаження брухту в приймальний бокс печі, де він нагрівається до температури 400…500 ^{0}C. При цьому органічні домішки газифікуються і заміщують до 80 % паливного газу. В подальшому нагрітий брухт занурюється в розплав алюмінію, а електромагнітний насос забезпечує циркуляцію розплаву та інтенсифікацію процесу плавлення. Плавильна піч Ecomelt PS має потужність 12 т/год (250 т/добу). Завдяки поєднанню закритого завантажувального боксу печі та високоефективного обладнання для спалювання, забезпечується дотримування екологічних норми [26].

В той же час відбивні плавильні печі замінюються похилими ротаційними/обертовими плавильними печами. Це обумовлено тим, що останні мають на 50 % більшу продуктивність при зростання металургійного виходу на 3…5 % та зменшенні витрат палива до 25 % [27].

Роторні плавильні печі у порівнянні з відбивними печами відзначаються дуже турбулентними хіміко-динамічними процесами, які досить важко моделювати. Це обумовлено випадковим законом переміщування брухту, розплаву та гарячого газу, неоднорідністю брухту, переносом енергії та взаємодії розплаву з твердим брухтом. В той же час числове моделювання дозволяє вдосконалити процес і оптимізувати конструкцію печі. Кардинальним системним технічним рішенням є перехід від печей з стаціонарної горизонтальної вісі обертання до нахиленої під кутом вісі обертання печі. Це дозволяє мінімізувати час таких технологічних операцій, як: завантаження шихти, видалення розплаву та шлаку. Крім того, в таких печах можливо плавити брухт без використання флюсів [23]

Роторні печі похилі для плавлення як різних видів алюмінієвого брухту, так і дросу, розробляє компанія Melting Solutions, США, Велика Британія [28]. Покупцям пропонується лінійка печей місткістю від 1 до 23 тон алюмінію.

В Україні роторні печі похилі реалізує ТОВ «Вогнемаш – Україна», м. Кривий Ріг [29] і ПП «Компанія ЛІК», м. Черкаси [30].

Технологія плавки та соляні електричні печі застосовується для перероблення складного алюмінієвого брухту [31]. Конструктивно соляна піч в однофазному виконанні оснащена верхнім та нижнім вуглеграфітовими електродами. В якості соляної ванни використовували суміш NaCl–KCl з добавками NaF і $BaCl_2$. Комбінована електросольова обробка розплаву забезпечує рафінування та модифікування структури алюмінієвих сплавів. Сферами застосування цих печей є переробка алюмінієвих стружки та відходів машинобудівних заводів.

Електрошлаковий метод переплаву на установці А-550 використали для переплавки некомпактних відходів (стружка) алюмінієвих сплавів АЛ25, Д16 і АМг2. Технологія передбачала використання соляного шлаку, що містив NaCl, KCl, $KCl*MgCl_2$ та Na_3AlF_6. При цьому продуктивність печі становила 100…120 кг/год при витратах електроенергії 450…500 кВт/год. Соляний шлак вводився в кількості 10…15 % від маси металевої шихти, а втрати металу становили 2…4 %. Визначено, що механічні властивості сплаву АЛ25 в чушках, отриманого електрошлаковим переплавом, відповідають вимогам стандарту [32, 33].

Для забезпечення чистоти вторинних алюмінієвих сплавів від газів (водню) та неметалевих (окисних) включень слід в технологічній схемі передбачити відповідні технологічні процеси. Серед них: рафінування інертними газами, вакуумування, фільтрація, використання таблетованих солей та роторну дегазацію [23]. В той же час слід відзначити, що в проаналізованих роботах відсутні дані стосовно вимірювання вмісту газів і окисних включень в готових розплавах алюмінієвих сплавів.

Освітні аспекти. Подальший розвиток в Україні вторинної переробки відходів та брухту металів в значній мірі залежить від підготовки в технічних університетах відповідних спеціалістів. В першу чергу це вимагає запровадження учбово-практичних курсів з рециклінгу металевого брухту, включаючи інформацію стосовно виробників відповідного обладнання та стану сучасного світового ринку металевого брухту та відходів. Звертаю увагу викладачів та науковців на книги з проблематики переробки вторинних алюмінієвих сплавів, а саме: Christopher J. Schmitz. Handbook of Aluminium Recycling. Vulkan-Verlag GmbH (June 1, 2007). 510 p. та Mark E. Schlesinger. Aluminium Recycling. Second Edition. CRC Press. 2013. 282 p.

Висновок

Світовий ринок алюмінієвого брухту та відходів активно розвивається. За період з 2001 по 2019 р. експорт алюмінієвого брухту в кількісному вимірі збільшився в 2,7 рази, а в вартісному – в 3,6 рази. Це обумовлено енергоефективністю вторинної переробки, яка дозволяє зменшити витрати на 95 % порівнянно з виробництвом первинного алюмінію. Крім того слід враховувати зростання попиту на алюмінієві сплави в сегменті електромобілебудування. З іншого боку ЄС проводить політику щодо 95 % утилізації старих автомобілів. Для переплавки алюмінієвого брухту та відходів використовують досить широку гамму плавильних агрегатів, як у сольовому, так і безсольовому виконанно. Проте з точки зору енергоефективності, теплообміну та охорони навколишнього середовища потрібно розробляти більш досконалі конструкції плавильних печей. Вочевидь в Україні настав час для створення промисловості переробки металевого брухту та відходів.

Список літератури

1. International Aluminium Institute. URL: http://www.world-aluminium.org.
2. Bayliss C. The Aluminium Story (2019). 2019 Light Metals Keynote Session: Aluminum Industry: Vision for the Next Decade. San Antonio, Texas. March 10-14, 2019. 41 p.
3. Metal Recycling Factsheet. EuRIC AISBL – Recycling: Bridging Circular Economy & Climate Policy. URL: https://www.euric-aisbl.eu/
4. Passarini, F., Ciacci L., Nuss P. and Manfredi S., Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28, EUR 29220 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018. 104 p.
5. 2019 Recycling Industry Yearbook. Institute of Scrap Recycling Industries. USA. 2019. 80 p.
6. Strategy on Resource Efficiency in aluminium sector. Ministry of Mines Government of India. Januar 2019. 110 p.
7. Бойченко С. В., Іванченко О. В., Яковлєва А. В. Рециклінг і утилізація авіаційної техніки: світові тенденції та особливості впровадження. Наукоємні технології, 2017. № 2 (34). С. 140–149.
8. International Trade Centre. URL: http:/intracen.org/
9. Бази даних Світового банку. URL: https://www.worldbank.org/
10. Держстат України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/
11. Верховлюк Ф. М., Довбенко В. В., Червоний І. Ф. Аналіз технологій переробки алюмінієвого скрапу. Scientific Journal «ScienceRise», Технічні науки. 2019. № 12 (65). С. 47–54.
12. Селянин И. Ф., Деев В. Б., Кухаренко А. В. Ресурсо- и эколосберигающие технологии производства вторичных алюминиевых сплавов. Известия вузов. Цветная металлургия. 2015, № 2. С. 20–25.
13. Strategy on Resource Efficiency in aluminium sector. Ministry of Mines Government of India. Januar 2019. 110 p.
14. Bernd K. Improvement Of The Metal Recovery From Dross By Centrifuging Of Hot Dross. 1995. URL: https://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=208061&title=Improvement-Of-The-Metal-Recovery-From-Dross-By-Centrifuging-Of-Hot-Dross/
15. The TARDIS Gen II Dross Presses. URL: https://www.altek-al.com/dross-press.html/
16. Верховлюк Ф. М., Довбенко В. В., Червоний І. Ф. Особливості переробки алюмінієвого шлаку. Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали IV міжнар. наук.-прак. конф., 1–3 квіт. 2020р., м. Івано-Франківськ/ Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,

2020. Т. 1. С. 162–163. URL: http://ukrtsa.org.ua/media/theses/4-prykladni-naukovo-tekh nichni-doslidzhennia/ATSU2020_T1_P162.pdf.
17. Unlu N., Drouet M. G. Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes. Elsevier Science B. V. Resources, Conseration and Recycling. 2002. 36. pp. 61–72.
18. WO2014/207072Al Aluminium Dross Processing. C22B7/04(2006.01). Priority Data: 26 June 2013.
19. PyroGenesisUnveils New Mini–DROSRITE™ System. GlobeNewswire–June 25, 2018. URL: https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2018/11/PyroGenesis-Unveils-New-Mini-Drosrite-System_Final.pdf.
20. Baklanov J. New approach in Aluminium Production from Aluminium Slag–Economical, Technical and Environmental Analysis. Tallinn university of technology. Master of Science in Engineering. Tallinn 2015. 92 P.
21. Радченко В. Г., Шабалин В. Н., Трашков К. М., Душаткин В. И., Широков И. С. Переплав алюминиевых шлаков в электродуговой печи. Ползуновский альманах. 2003, № 4. С. 78–79.
22. Dai C. Development of Aluminium Dross-based Material for engineering application. Master of Science. Worcester polytechnic institute. January 2012. 43 P.
23. Cappuzzi S., Timelli G. Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Re view. Metals 2018, 8, 249; 24 p.
24. Roadmap From Europe and North America. Workshop on Aluminium Recycling. 13th-15th June, 2010 Trondheim, Norway. 28 P.
25. Нестеренко Т. М. Перспективні напрями вдосконалення технології та обладнання для металургійної переробки вторинної алюмінієвої сировини. Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development. 2015. 7 С.
26. Multi Chamber Melting Furnace (Ecomelt). URL: http://www.hertwich.com/index.php/products/melting/multi-chamber-furnace.
27. Нестеренко Т. М. Сучасний стан переробки вторинної алюмінієвої сировини. 2017. 1 с.
28. The Tilt Rotary Furnace. Altek Melting Solutions Ltd., UK. 2012. 8 P.
29. Роторные наклонные печи. URL: https://vognemash.ucoz.com/board/rotornye_naklon nye_pechi/13.
30. Роторная наклонная печь для алюминия. URL: http://lik.ck.ua/production/8/rotornaya-naklonnaya-pech-dlya-alyuminiya/.
31. Барбин Н. М. Переработка вторичного сырья и техногенных отходов цветных металлов в ионных расплавах хлоридов, карбонатов, гидроксидов: автореферат дис. доктора технических наук: 05.16.07 / Ин-т металлургии УрО РАН. Екатеринбург, 2004. 42 с.
32. Смалюх М. Р. Електрошлаковий переплав некомпактних відходів сплавів на основі алюмінію. Магістерська дисертація. НТУУ «КПІ». 2015. 80 С.
33. Гнатушенко О. В. Нові технології електрошлакової плавки некомпактних відходів алюмінієвих і мідних сплавів та їх рафінування. Автореферат дис. на здобуття наукового ступеня канд. тех. наук, ІЕЗ ім. Є,О, Патона. Київ. 2011. 26 С.

Надійшла 04.08.2020

References

1. International Aluminium Institute. URL: http://www.world-aluminium.org. [in English]
2. Bayliss C. The Aluminium Story (2019). 2019 Light Metals Keynote Session: Aluminum Industry: Vision for the Next Decade. San Antonio, Texas. March 10-14, 2019. 41 p. [in English]
3. Metal Recycling Factsheet. EuRIC AISBL – Recycling: Bridging Circular Economy & Climate Policy. URL: https://www.euric-aisbl.eu/ [in English]
4. Passarini, F., Ciacci L., Nuss P. and Manfredi S. (2018) Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28, EUR 29220 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 104 p. [in English]
5. 2019 Recycling Industry Yearbook. Institute of Scrap Recycling Industries. USA. 2019. 80 p. [in English]
6. Strategy on Resource Efficiency in aluminium sector. Ministry of Mines Government of India. Januar 2019. 110 p.
7. Boychenko S. V, Ivanchenko O. V, Yakovleva A. V. (2017) Recycling and disposal of aircraft: global trends and features of implementation. Science-intensive technologies, no. 2 (34), pp. 140–149. [in Ukrainian]

8. International Trade Centre. URL: http:/intracen.org/ [in English]
9. World Bank databases. URL: https://www.worldbank.org/
10. State Statistics Service of Ukraine. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/ [in Ukrainian]
11. Verkhovlyuk F. M, Dovbenko V. V, Red I. F (2019) Analysis of technologies for processing aluminum scrap. Scientific Journal «ScienceRise», no. 12 (65), pp. 47–54.
12. Selyanin I. F, Deev V. B, Kukharenko A. V (2015) Resource-and eco-saving technologies for the production of secondary aluminum alloys. Proceedings of universities. Non-ferrous metallurgy, no. 2, pp. 20–25. [in Russian]
13. Strategy on Resource Efficiency in aluminium sector. Ministry of Mines Government of India. Januar 2019. 110 p.
14. Bernd K. (1995) Improvement Of The Metal Recovery From Dross By Centrifuging Of Hot Dross. [in English] URL:https://www.onemine.org/document/abstract.cfm?docid=208061&title=Improvement-Of-The-Metal-Recovery-From-Dross-By-Centrifuging-Of-Hot-Dross/
15. The TARDIS Gen II Dross Presses. URL: https://www.altek-al.com/dross-press.html/ [in English]
16. Verkhovlyuk A. M., Dovbenko V. V., Chervoniy I. F. (2020) Peculiarities of recycling aluminum slag. Applied scientific and technical advances: materials of the 4th international. nauk.-practical. conf., 1-3 april, 2020., M. Ivano-Frankivsk / Academy of Technical Sciences of Ukraine. Ivano-Frankivsk: DVNZ "Precarpathian National University of the Name of Vasyl Stefanyk", vol. 1, pp. 162–163. URL: http://ukrtsa.org.ua/media/theses/4-prykladni-naukovo-tekhnichni-doslidzhennia/ATSU2020_T1_P162.pdf. [in Ukrainian]
17. Unlu N., Drouet M. G. (2002) Comparison of salt-free aluminum dross treatment processes. Elsevier Science B. V. Resources, Conseration and Recycling, 36. pp. 61–72.
18. WO2014/207072Al Aluminium Dross Processing. C22B7/04(2006.01). Priority Data: 26 June 2013.
19. PyroGenesisUnveils New Mini–DROSRITE™ System. GlobeNewswire–June 25, 2018. URL: https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2018/11/PyroGenesis-Unveils-New-Mini-Drosrite-System_Final.pdf.
20. Baklanov J. (2015) New approach in Aluminium Production from Aluminium Slag–Economical, Technical and Environmental Analysis. Tallinn university of technology. Master of Science in Engineering. Tallinn. 92 P.
21. Radchenko V. G, Shabalin V. N, Trashkov K. M, Dushatkin V. I, Shirokov I. S (2003) Remelting of aluminum slag in an electric arc furnace. *Polzunovsky almanac*, no. 4, pp. 78–79. [in Russian]
22. Dai C. Development of Aluminium Dross-based Material for engineering application. Master of Science. Worcester polytechnic institute. January 2012. 43 P. [in English]
23. Cappuzzi S., Timelli G. (2018) Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review. Metals, 8, 249; 24 p. [in English]
24. Roadmap From Europe and North America. Workshop on Aluminium Recycling. 13th-15th June, 2010 Trondheim, Norway. 28 p. [in English]
25. Nesterenko T. M. (2015) Perspective directions of improvement of technology and equipment for metallurgical processing of secondary aluminum raw materials. Scientific researches and their practical application. Modern state and ways of development, 7 p.
26. Multi Chamber Melting Furnace (Ecomelt). URL: http://www.hertwich.com/index.php/products/melting/multi-chamber-furnace.
27. Nesterenko T. M The current state of processing of secondary aluminum raw materials, 2017, 1 p. [in Ukrainian]
28. The Tilt Rotary Furnace. Altek Melting Solutions Ltd., UK. 2012. 8 P.
29. Rotary inclined furnaces. URL: https://vognemash.ucoz.com/board/rotornye_naklonnye_pechi/13.
30. Rotary tilting furnace for aluminum. URL: http://lik.ck.ua/production/8/rotornaya-naklonnaya-pech-dlya-alyuminiya/.
31. Barbin N. M. (2004) Processing of secondary raw materials and technogenic waste of non-ferrous metals in ionic melts of chlorides, carbonates, hydroxides: abstract of dis. Doctor of echnical Sciences: 05.16.07 / Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Yekaterinburg, 42 p. [in Russian]
32. Smalyukh M. R. (2015) Electroslag remelting of non-compact wastes of aluminum-based alloys. Master's thesis. NTUU "KPI", 80 p. [in Ukrainian]
33. Gnatushenko O. V. (2011) New technologies of electroslag smelting of non - compact wastes of aluminum and copper alloys and their refining. Abstract dis. for the degree of Candidate of

Received 04.08.2020

V. A. Gnatush, *PhD (Engin.), independent analyst, e-mail: vgnatush@gmail.com*

GLOBAL TRENDS IN THE MARKET FOR RECYCLING WASTE AND SCRAP OF ALUMINUM ALLOYS

The analysis of the world market for recycling waste and scrap of aluminum alloys is presented. It is predicted that by 2040. the share of secondary aluminum alloys will reach almost 80% of aluminum production in the world. It is shown that for the period from 2001 to 2019. world export of aluminum scrap increased 2.7 times in quantitative terms and 3.6 times in value terms. Leaders in the global export market for aluminum scrap in 2019 are the USA (share 18.5%) and Germany (10.4%). For the period from 2015 to 2019. the most dynamic exporters of aluminum scrap are Japan (up 1.9 times), Mexico (1.7 times), Belgium (1.3 times) and the USA (1.2 times). The largest importers of aluminum scrap in the world in 2019 were China (13.7% share) and India (13.4%). The analysis of the structure of waste and scrap of aluminum in Ukraine for 2018 is presented. Based on the commodity structure of the formation of aluminum waste and scrap, the world has developed appropriate technologies and equipment. The developed and used technologies for processing non-metallic aluminum waste (slag, dross), both in salt and salt-free versions, are considered. Information on technologies and designs of furnaces for processing aluminum scrap is also provided. The positive and negative indicators of their operation are shown. The prospects of using inclined rotary furnace for large-scale processing of aluminum scrap are noted. Attention is drawn to the need to train specialists in Ukraine in the field of processing scrap metal and waste.

Keywords: *market, secondary aluminum alloys, waste, scrap, slag, technologies, trends, production, melting furnaces.*