

УДК 658.567.1

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804222020213327>Н. М. Руденко¹, доцент, к.ф.-м.н., Т. Т. Сілакова², доцент, к.ф.-м.н.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА В АВІА- ТА РАКЕТОБУДУВАННІ

En

The article is devoted to the problem of disposal of the production wastes components of aviation and rocket science, as well as airplanes which have fulfilled the resource. Every year, an increasing amount of aerospace engineering (ACP) accumulates at various sites, occupying large areas. Therefore, the issue of its disposal becomes more urgent.

This article provides an analysis of the methods of of polymer composites (PCMs) disposal, components of aerospace engineering. It is shown that in the area of PCM utilization for each type of fillers it is advisable to use its own method of utilization: for fiberglass it is pyrolysis and to a lesser extent thermocatalysis; for carbon fiber, it is thermocatalysis, solvolysis and pyrolysis; for organoplasty, this is low- and medium-temperature pyrolysis, perhaps thermocatalysis, but this method requires further study.

Advantages and disadvantages of the applied technologies are given, recommendations on methods of disposal of polymeric composite materials are considered. Ways of quality assurance of this process, promising technology of "joint utilization" of waste of reinforced PCM, (Co-processing) are also considered.

The analysis of the literary sources concerning the regulatory and technical base for the disposal of aviation and rocket waste makes it possible to conclude that at present the utilization of aircraft elements is considered as an integral part of the utilization processes, with little or no separation. The regulatory framework is mainly designed to recycle metal compounds and often it only requires quality requirements for the products being recovered and does not for the quality of the products resulting from the disposal. The existing requirements for the quality of the obtained products are practically not consolidated in the regulatory and technical base, looking separately for each technological process and having significant differences in different literary sources, and the regulatory and technical base for the utilization of elements of aircraft, consisting of composites, now is practically missing.

Ru

Статья посвящена проблеме утилизации компонентов отходов производства авиа- и ракетостроения, а также летательных аппаратов, которые отработали свой ресурс. С каждым годом все большее количество аэрокосмической техники накапливается на разных площадках, занимая большие площади. Поэтому вопрос ее утилизации становится все более актуальным.

Приводится анализ методов утилизации полимерных композиционных материалов (ПКМ), компонентов аэрокосмической техники. Показано, что в области утилизации ПКМ для каждого типа наполнителей целесообразно использовать свой метод утилизации: для стеклопластика - это пиролиз и в меньшей степени Термоком катализа; для углепластика - это термокатализ, со-

¹ КПИ ім. Ігоря Сікорського

² КПИ ім. Ігоря Сікорського

льволиза и пиролиз; для органопластик - это низко и среднетемпературный пиролиз, возможно - термочувствительный, но этот метод требует дальнейшего изучения.

Вступ

Актуальність проблеми обумовлена тим, що на даний момент проблема утилізації компонентів відходів виробництва авіа- та ракетобудування, а також літальних апаратів, які відпрацювали свій ресурс, є однією із найважливіших для всієї аерокосмічної галузі. З кожним роком все більша кількість аерокосмічної техніки (АКТ) накопичується на різних майданчиках, займаючи великі площі. Тому питання її утилізації стає все більш актуальним.

Як і будь-який технологічний процес, утилізація повинна бути строго регламентована. Однак авіакосмічна промисловість використовує значну кількість матеріалів для виробництва різних елементів, не всі із яких прості в утилізації. Крім того, важливо домогтися не тільки виконання безпосередньо утилізації, а ще й, по можливості, отримати вторинні матеріали, які можуть бути використані для різних цілей. Питання створення нормативно-технічної бази із утилізації елементів літальних апаратів (особливо полімерних композиційних матеріалів), а також щодо забезпечення якості отриманої продукції, на даний момент є дуже актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тема широко досліджується вітчизняними та зарубіжними авторами, зокрема питання економічного ефективного використання відходів розглядається у працях В. С. Міщенко, Г. П. Виговської, В. Єрмоленка, Т. Л. Омеляненка, Ю. М. Маковецької, І. П. Дрозд, В. І. Коломієць. Проблемою утилізації відходів авіа- та ракетобудування займалися зарубіжні вчені: М. С. Дориомедов, М. И. Дасковский, Е. Н. Каблов, Ю. В. Куликова, Д. Н. Макаренко, А. В. Петров, С. Ю. Скрипачев, Н. Н. Слюсарь, Г. И. Шайдунова.

Метою статті є дослідження способів і промислових науково обґрунтованих та економічно доцільних технологій переробки відходів авіа- та ракетобудування, особливо полімерних композиційних матеріалів.

Постановка задачі

За оцінками експертів, на світовому ринку виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які широко використовуються у авіа- та ракетобудуванні, домінують Китай (28 %), США (22 %), ЄС (14 %).

Збільшення виробництва і споживання ПКМ незмінно тягне за собою зростання відходів, що виникають, як на етапі виробництва, так і після за-

вершення терміну експлуатації виробів. У зв'язку із цим питання утилізації та переробки ПКМ із кожним днем стає все більш гострим. Ряд країн і міжнародних організацій наполягають розглядати у якості стратегічного напрямку розвитку безвідходних технологій, виробництв замкнутого циклу. Це не означає, що відходів не буде взагалі, але їх кількість повинна бути мінімізована і передбачено використання у супутніх продуктах або можливість повторного застосування із паралельною розробкою найбільш раціональних програм рециклінгу. Вибір теми дослідження обумовлений важливістю завдань технології утилізації відходів авіа- та ракетобудування.

Завданням статті є: вивчення складу, структури, властивостей відходів авіа- та ракетобудування, а також аналіз технології утилізації цих відходів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Оборонна і аерокосмічна промисловість вперше застосувала композиційні матеріали, сьогодні більшість літаків мають вагу, яка понад 50 % складається із композитів. Нещодавно композити стали основним матеріалом для нового покоління комерційних літаків, таких як *Boeing 787 «Dreamliner»* (50 %) і *Airbus A380* (25 %) і майбутнього *A 350* (53 %). У країнах ЄС лідером із виробництва композиційних матеріалів є Німеччина, за якою слідують Італія і Франція. Ці три країни складають більше 60 % від загального обсягу вироблених у Європі композиційних матеріалів [1].

З усіх типів композиційних матеріалів найбільшого поширення набули композити на полімерній матриці, армовані волокнами (близько 90 %). Потому, 90 % із них – це полімерні композиційні матеріали, армовані скловолокном (склопластики). Решта 10% – в основному полімерні композиційні матеріали, армовані углеволокном (вуглепластики). Частка інших армуючих елементів досить невелика.

Зростаюче виробництво і споживання композиційних матеріалів призводять до збільшення кількості відходів, до яких відносяться продукти із вичерпаним терміном служби (*end of life – EOL*) і відходи виробництва композиційних матеріалів.

Оскільки продукція на основі склопластиків і вуглепластиків, як значалося раніше, займає домінуюче становище на ринку, відходи цих матеріалів і викликають у даний час найбільшу стурбованість. Ще кілька років тому проблема утилізації цих відходів не стояла так гостро, оскільки обсяги їх утворення були не значні зважаючи на тривалий термін експлуатації виробів з композиційних матеріалів (20 – 25 років), більш низьких обсягів виробництва композитів пару десятиліть назад, менш суворих законодавчих вимог у сфері поводження із відходами.

За оцінками, загальний сукупний обсяг відходів виробництва і споживання склопластиків у ЄС у 2015 році досяг 304 тис. тонн, а обсяг виро-

бництва 1069 тис. тонн. Із урахуванням того, що частка ЄС у світовому виробництві склопластиків становить 31 %, то світові обсяги утворення відходів склопластику можна оцінити на рівні 980 тис. тонн. Загалом обсяги накопичення композиційних матеріалів становлять близько 4 млн. тонн/рік [2, 3].

Раніше поховання і спалювання були найбільш поширеними методами знешкодження відходів скло і вуглепластиків. Однак, із огляду на законодавство ЄС щодо поводження із відходами, а також зростання цін на податки на звалища, ці методи будуть у найближчому майбутньому недоступні.

Державний класифікатор України «Класифікатор відходів ДК 005-96» [4] виділяє авіакосмічній галузі 1 позицію – 3530.1.0.08 «Заготовки з інших авіаційних металевих матеріалів (волокнистих матеріалів, дисперсно-зміцнених матеріалів, керметів, біметалів, тугоплавких металів тощо). Зіпсовані, забруднені або неідентифіковані, які не можуть бути використані за призначенням».

На даний момент основними методами утилізації відходів виробництва авіа- та ракетобудування є: гільйотинне різання; застосування ручних відрізних машин; електроіскровий метод; ультразвуковий метод; повітря-плазмене різання; лазерна різка.

Для утилізації відходів із композиційних матеріалів застосовуються наступні методи:

1. хімічні: сольволізу; термokatаліз;
2. фізичні: механічні; радіаційні;
3. термічні: спалювання; газифікація; піроліз [5].

Застосування кожного із методів залежить від характеру утилізованого об'єкта, його хімічного складу і фізичних властивостей. Розглянемо їх більш детально.

– Метод гільйотинного різання

Даний метод є високопродуктивним і може застосовуватися для будь-яких матеріалів і металів, й неметалів. Основною рисою даного методу є простота у використанні і невелике екологічне забруднення у порівнянні із іншими методами. Однак застосування даного методу вимагає попередньої обробки відходів до елементів, які можна буде розрізати, установки спеціального оснащення для закріплення елементів конструкції і застосовується тільки для однорідних матеріалів. При цьому створюється високий рівень шуму і вібрації на робочому місці.

– Застосування ручних відрізних машин (верстатів)

Даний метод є зручним у використанні, особливо коли необхідна точність по заздалегідь наміченій траєкторії. У разі такого метода забезпечується висока швидкість різання, можлива швидка заміна ріжучого інструменту, що дозволяє не зупиняти процес утилізації. Однак даний метод ха-

рактизується більшими виділеннями абразивного пилю і наявністю іскор, що вимагає додаткових заходів для захисту персоналу. Крім того, створюється високий рівень шуму і вібрацій.

– Електроіскровий (електроерозійний) метод

Даний метод має високу точність різку, але практично не застосовують через необхідність використання діелектричного середовища (гас) між електродом інструменту і електродом елемента. Крім того, він потребує стаціонарної установки.

– Ультразвуковий метод

Даний метод використовують для важкооброблюваних матеріалів і сплавів. Метод вимагає подачі у зону різання суспензії, яка складається із води і абразивних зерен.

– Метод повітряплазменого різання

Даний метод можна застосовувати для утилізації відходів з тугоплавких матеріалів і легованих сталей, а також для кольорових металів. Метод має високу швидкість у разі розрізання алюмінієвих сплавів. Для нього характерна висока чистота різку. До недоліків методу відносяться необхідність стаціонарної установки і значне споживання газу.

– Метод лазерного різання

Даний метод дозволяє розрізати важкообробляемі матеріали із великою глибиною і швидкістю різання по різних траєкторіях. Метод є дорогим і промислово не використовується.

Аналіз показав, що конкретних нормативних документів, що регламентують процес обробки відходів гільотиною різкою, застосуванням ручних відрізних машин (верстатів), електроіскровий і ультразвукової обробкою, а також повітряплазменою і лазерною різкою, на даний момент не існує. Дані технологічні процеси однотипні для будь-якого виду виробів, незалежно від їх походження і включає вимоги до обладнання та оброблюваних матеріалів.

– Термокатализ

Даний метод заснований на високотемпературній хімічній реакції, у результаті якої домішки, що знаходяться у газі, перетворюються на інші сполуки. До переваг цього методу слід віднести безперервність технологічного процесу очищення у поєднанні із високим ступенем очищення. До недоліків відносяться значні енергетичні витрати і затрати на регулярну заміну катализатора. Спалювання засноване на високотемпературному впливі на органічні гази, що дозволяє поряд із високим ступенем очищення, використовувати отримане тепло для технологічних потреб. Однак, до основних недоліків відносяться високі витрати на енергоспоживання і на газ [5, 6]. Таким чином, термокатализ доцільно застосовувати під час спа-

лювання різних композитів, забезпечуючи очищення повітря, що відходить.

– Сольволіз

Поняття сольволізу об'єднує різні способи деполімеризації (метаноліз, гідроліз, ацидоліз, алкохоліз) [7, 8]. Сольволіз – реакція обмінного розкладання між розчиненими речовиною і розчинником. Велика кількість різних композиційних матеріалів може бути утилізована даним методом. Особливо він непогано підходить для утилізації елементів, що містять поліетилентерефталат [9].

Найбільше поширення переробка вуглепластиків за допомогою процесу сольволізу отримала у Японії [10]. Зокрема, особливих успіхів у цій галузі досягла компанія *Hitachi Chemical* – процес здійснюється за низького тиску (до ~ 2 ат) і температурі не більше 200°C.

Перевагами даного методу є: порівняльна простота апаратурного оформлення, енергоефективність процесу утилізації, а також те, що продукти розкладання епоксидного в'язучого можливо використовувати під час повторного синтезу епоксидних смол. Вихідними продуктами є волокно і деполімеризовані епоксидні в'язучі.

Цікаві результати отримані також в рамках проекту цільової програми Європейського союзу *EURECOMP* (2009-2012 рр.), який спрямований на розвиток фізико-хімічних процесів утилізації ПКМ, зокрема сольволізу [11]. Встановлено, що процес сольволізу дозволяє видалити до 90 % смоли, у результаті чого утворюються відновлене волокно і рідка фракція (хімічна речовина), склад якої має потенційну комерційну цінність, зокрема такі речовини, як бензойна кислота, бензальдегід, ізопропілфенілкетон, метилетіловий ефір, метілізобутіловий ефір, бензол і ацетальдегід.

Аналіз існуючих джерел показав, що нормативних документів, котрі визначають і регулюють процеси сольволізу і термokatаліза, а також утилізації за їх допомогою, не існує.

Спалювання полімерних композиційних матеріалів є найпростішим способом їх утилізації, але існує низка недоліків, таких як утворення різних продуктів горіння, що володіють токсичними властивостями, які потребують додаткової очистки.

– Газифікація полімерних композиційних матеріалів

Дана технологія утилізації передбачає перетворення композиційних матеріалів в повторно використовувану безпечну продукцію (осклований шлак, метал, сірка, паливо, газ, електроенергія). Основним етапом переробки є газифікація (перетворення маси відходів у газ, шлак і метал) у камері плазменого газогенератора, обладнаного плазмовими пальниками, що створюють плазму електричним способом за рахунок електричних розрядів. Даний процес має велику кількість переваг, таких як відсутність первинного сортування, утворення синтез-газу, який можна застосувати для

господарських потреб тощо [12]. Однак для реалізації даного методу утилізації потрібна велика кількість електроенергії.

– Піроліз полімерних композиційних матеріалів

Даний метод при різних температурах (до 1000°C) дозволяє отримати висококалорійне паливо (технічний вуглець), сировину та напівпродукти, що використовуються в різних технологічних процесах. У процесі піролізу утворюються низькомолекулярні граничні вуглеводні сполуки, які піддаються подальшому крекінгу із метою збільшення виходу ненасичених сполук, що використовуються під час синтезі поліолефінів [7].

Аналіз існуючих джерел показав, що нормативних документів, котрі визначають і регулюють процес утилізації полімерних композиційних матеріалів за допомогою піролізу, не існує.

Відсутність ринків, висока вартість переробки і низька якість отримуваних вторинних матеріалів у порівнянні із оригінальними є основними бар'єрами для комерціалізації і будуть перешкоджати подальшому використанню перероблених композиційних матеріалів у автомобільній, аерокосмічній та іншій техніці і споживчих товарах. Але з огляду на довгостроковість процесів деструкції композиційних матеріалів (за різними даними до 200 років) [13] і постійне посилення екологічного законодавства, у довгостроковій перспективі розробка технологій утилізації є актуальною [2].

Розробка інноваційних технологій у галузі забезпечення завершення життєвого циклу виробів із композиційних матеріалів іде за трьома основними напрямками:

- розробка складу композиційних матеріалів, що забезпечує простоту і економічність процесів переробки (наприклад, заміна термосетів на термопласти);
- розробка ефективних технологій переробки раніше вироблених матеріалів;
- розробка технологій використання вторинних армуючих волокон.

За 2010-2015 роки у Європейському союзі в якості основної перспективної технології утилізації відходів армованих ПКМ розглядається технологія «спільної утилізації» (*Co-processing*). Технологія «спільної утилізації» передбачає використання подрібнених відходів ПКМ у якості сировини для виробництва нових матеріалів і джерела енергії у цементних печах, а також альтернативної заміни викопних видів палива (вугілля, нафта, газ). Даний метод переробки рекомендований *European Composites Industry Association (EuCIA)*, *European Plastics Company (EuPC)*, *European Composite Recycling Service Company (ECRC)* та іншими (табл. 1).

Таблиця 1.

Зарубіжні компанії, що запускають виробництво по переробці ПКМ

Компанія	Перероблені матеріали	Результат
<i>Extreme EcoSolutions</i> (Нідерланди)	Затверділий склопластик і його продукти	Подрібнення склопластиків до стану порошку, їх транспортування до Норвегії для використання у якості добавок у виробництві поліетиленових плівок
<i>Carbon Fibre Recycle Industry Co. Ltd.</i> (Японія)	Відходи вуглепластиків	Переробка за допомогою термічного розкладання процесом самозаймання. Очікувана потужність переробки - від 1080 т/рік
<i>Global Composites Recycling Solutions</i> (Великобританія)	Затверділий склопластик і скляне волокно	Подрібнення склопластиків і скляного волокна для отримання матеріалу <i>Ecopolycrete</i> . Буде використовуватися для виготовлення залізничних переїздів, паркувальних місць та ін.
<i>Hambleside Danelaw</i> (Великобританія)	Затверділий склопластик	Розроблено власний процес механічного переробництва склопластиків зі збереженням довжини волокна. Це відновлене волокно буде використовуватися у якості звичайного армуючого наповнювача і добавки у бетон
<i>Karborek RCF</i> (Італія)	Відходи вуглепластику	Процес піролізу з рециркуляцією енергії. Використовуватиметься для виробництва нарізного або подрібненого вуглецевого волокна. Потужність - до 1500 т / рік

Висновки та перспективи досліджень.

Проведений аналіз зарубіжного досвіду утилізації ПКМ показує, що для кожного типу наповнювачів доцільно використовувати свій метод утилізації: для склопластику - це піроліз і у меншій мірі термокаталіз; для вуглепластику - це термокаталіз, сольволіз і піроліз; для органопластику - це низько- і середньотемпературний піроліз, можливо - термокаталіз, але цей метод вимагає подальшого вивчення.

Аналіз літературних джерел, що стосуються нормативно-технічної бази утилізації відходів виробництва авіа- та ракетобудування, дозволяє зробити висновки про те, що на даний момент утилізація елементів літальних апаратів розглядається як складова частина процесів утилізації, практично не виділяючись окремо. Нормативно-технічна база в основному визначена для утилізації металевих з'єднань і часто пред'являються лише вимоги до якості продукції, яка утилізується, а не до якості продукції, отриманої.

маної у результаті утилізації. Існуючі вимоги до якості отриманої продукції практично не зведені в нормативно-технічну базу, роздивляючись окремо для кожного технологічного процесу і маючи суттєві відмінності у різних літературних джерелах, а нормативно-технічна база з утилізації елементів літальних апаратів, що складаються із композитів, на даний момент практично відсутня.

Таким чином, питання створення нормативно-технічної бази із утилізації елементів літальних апаратів (особливо тих, які складаються з композитів), а також щодо забезпечення якості отриманої продукції, на даний момент є перспективами подальшого розвитку процесів утилізації.

Список використаної літератури

1. Yang Y., & al. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing*, 51, 53-68.
2. Goodship V. (ed.). (2010). *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites*. Woodhead publishing, 612.
3. Witten E., Kraus Th., Kühnel, M. (2016). *Composites Market Report. 2016. Market developments, trends, outlook and challenges*, 44.
4. Класифікатор відходів ДК 005-96: Державний класифікатор України; Наказ Держстандарту України від 29 лютого 1996 р. № 89. — <http://tc.nusta.com.ua/dkpk/dgerela/225.htm>
2. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. (2015) Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* (8). С. 2–16.
3. Ветошкин А. Г. (2006). *Процессы и аппараты газоочистки: учеб. пос.* Пенза, Изд-во ПГУ, 201.
4. Бодьян Л. А., Варламова И. А., Гиревая Х. Я., Калугина Н. Л., Медяник Н. Л. (2014). Продукт химической деструкции полиэтилентерефталата как комплексный реагент для извлечения органической массы угля. *Современные проблемы науки и образования.* (2), 700.
5. Дориомедов М. С., Петров А. В., Дасковский М. И., Скрипачев С. Ю. (2016). Переработка армирующих наполнителей при утилизации изделий из ПКМ. *Труды ВИАМ: электрон. науч.технич. журн.* (7). С. 1–6.
6. Gosau J-M., Wesley T. F., Allred R. E. (2017) Carbon fiber reclamation from state-of-the-art 2nd generation aircraft composites. *Adherent Technologies, Inc*, <https://www.adherent-tech.com/>
7. Каблов Е. Н. (2015). *Композиты сегодня и завтра. Металлы Евразии.* Москва, Наука и технологии, С. 36-39.
8. Михеев, С. В., Строганов Г. Б., Ромашин А. Г. (2002) *Керамические и композиционные материалы в авиационной технике.* Москва, Альтекс, 276.

9. Final Report Summary - EURECOMP (Recycling Thermoset Composites of the SST), <http://cordis.europa.eu>.
10. Куликова Ю. В., Слюсарь Н. Н., Шайдурова Г. И. (2017). Анализ проблемы утилизации отходов композиционных материалов. Бюллетень науки и практики, (11 (24)), С. 255-261.
11. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. (2015). Зарубежный опыт развития производства изделий с использованием вторично переработанных полимерных композиционных материалов (обзор). Труды ВИАМ, (12), С. 98-104.