

## ЗВАРЮВАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ В АВІАЦІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ (Огляд)

М.В. Юрженко<sup>1</sup>, М.Г. Кораб<sup>1</sup>, Р.В. Колісник<sup>1</sup>, О.П. Масючок<sup>1</sup>, А.В. Андрєєв<sup>2</sup>, В.С. Петропольський<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup> ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева 1. E-mail: [support@antonov.com](mailto:support@antonov.com)

Кількість конструкцій з полімерних композитних матеріалів у авіабудуванні постійно збільшується. Традиційними у цій галузі є полімерні композити на основі термореактивних матриць, однак актуальним є використання нових термопластичних композитів, які мають низку переваг у порівнянні з термореактивними. Застосування термопластичних композитних матеріалів дозволяє активно використовувати процеси зварювання при виробництві конструкцій, що суттєво підвищує продуктивність робіт та зменшує їх вартість. Найбільше в авіабудуванні використовують три види термостійких полімерів класу поліариленів – поліетеретеркетони (РЕЕК та РЕКК), поліетерімід (PEI) та поліфеніленсульфід (PPS). Авіаційні конструкції характеризуються великим розмаїттям та складністю форм, тому для з'єднання їх залучають практично усі відомі способи зварювання пластмас. Активно застосовують терморезисторне зварювання полімерних матеріалів за допомогою закладних елементів з металевої сітки чи вуглецевої тканини. Для з'єднання конструкцій із електропровідних вуглецевих композитів придатна технологія індукційного зварювання. Використовують в авіабудуванні також ультразвукове зварювання, лазерне зварювання та зварювання нагрітим інструментом з непрямым нагрівом. На даний час процеси зварювання зазвичай контролюються цифровим способом зі збереженням усіх даних, однак, на порядку денному перехід до лінійного керування процесом з використанням контролю температури. У даній роботі за матеріалами європейських публікацій наведено приклади застосування різних методів зварювання при виробництві конструкцій із сучасних полімерних термопластичних композитів в авіаційній промисловості. Бібліогр. 16, рис. 9.

*Ключові слова:* полімерні композитні матеріали, термопласти, зварні з'єднання, терморезисторне зварювання, індукційне зварювання, ультразвукове зварювання

Провідний авіавиробник ДП «Антонов» активно співпрацює з інститутами Національної академії наук України для розробки та впровадження передових авіаційних технологій. Одним з напрямків таких робіт з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона є підготовка до застосування у вітчизняних літаках нових полімерних композиційних матеріалів [1].

В сучасному авіабудуванні значну частину деталей літака виготовляють з полімерних композитів – волокнистих або тканих матеріалів, просочених полімерними матрицями. Використання композитів дозволяє суттєво підвищити вагову ефективність авіаційно-космічних апаратів, у перспективі їх частка досягне 70...75 % конструкцій літака [2]. Традиційними у цій галузі є полімерні композити на основі термореактивних матриць, однак, постійно зростає використання нових термопластичних композитів (ТПК), які мають низку переваг у порівнянні з термореактивними.

Головним стимулом для використання ТПК в авіаційній галузі є можливість з'єднання деталей з них за допомогою зварювання. Процес зварювання є значно кращою альтернативою традиційним методам з'єднання деталей із термореактивних композитів – механічному кріпленню та клейовому з'єднанню. Інші переваги ТПК – можливість

перетворення (переплавки) в процесі ремонту та утилізації, вони не вимагають складних хімічних реакцій та тривалих процесів твердіння, не потребують особливих умов зберігання, а строк зберігання ТПК практично необмежений. В даній статті наведено огляд основних методів зварювання полімерних термопластичних композитів, що застосовуються в сучасній авіаційній промисловості.

Оскільки елементи літальних апаратів зазвичай працюють в екстремальних умовах механічних та теплових навантажень, термопластичні композити для авіації виготовляють на базі міцних та термостійких полімерних матриць. Разом з традиційними полікарбонатами та поліамідами у цій галузі широко використовують три види сполук класу поліариленів – поліетеретеркетони (РЕЕК та РЕКК), поліетерімід (PEI) та поліфеніленсульфід (PPS) [3]. Поліарилени – карбоциклічні полімери, в складі молекулярних ланцюгів яких присутні кільцеві бензолні ядра, які являють собою стійку хімічну структуру та забезпечують полімеру високу термічну стійкість.

Мономери поліетеркетонів, у різних комбінаціях складаються з трьох основних складових частин – проста етерна група, арильна циклічна вуглеводнева група та кетонна органічна сполука з подвійним хімічним зв'язком. В залежності від

кількості складових частин у мономері розрізняють поліетеркетон (РЕК), поліетеркетонкетон, (РЕКК), поліетеретеркетон (РЕЕК) і тому подібні. Усі ці полімери мають температуру плавлення вищу за 330 °С та можуть використовуватись як матриці ТПК.

Мономери поліетеріміду (PEI) також складаються з трьох основних частин – проста етерна група, кільцева арильна група та імідна група, похідна від карбонових кислот. PEI – це високоякісна вогнестійка термопластична матриця для ТПК, яка відноситься до групи жаростійких пластиків з термостійкістю до 200 °С. Він має високі механічну міцність, діелектричну міцність, стійкість до гідролізу, дії ультрафіолетового та гамма-випромінювання.

Мономери поліфеніленсульфіду (PPS) мають найпростішу структуру та складаються з арильної групи та атому сірки. PPS – відносно дешевий та високоякісний полімер, дуже міцний, жорсткий та щільний, а також має природну вогнестійкість та жаростійкість при температурах безперервної експлуатації суттєво вище 200 °С. PPS, також стійкий до окислення та дії хімічних речовин, поглинає мінімальну кількість води, має гарні електричні та чудові технічні властивості, а також малу вірогідність деформації [4].

Переважає більшість полімерних конструкцій сучасного літака виготовляється із листових композитних напівфабрикатів – препрегів. Препреги – від англійського *pre-impregnated* (попередньо просочений) – отримують шляхом просочення волокнистої основи (вуглецевої або скло-тканини спеціального плетіння) рівномірно розподіленим шаром полімерної матриці. Провідними виробниками сучасних композитних матеріалів як терморезистивних, так і термопластичних є компанії TenCate Advanced Composites та Porcher Industries

[5, 6]. Термопластичні композитні матеріали випускаються у наступних формах:

- семіпреги – тканини та однонаправлені волокнисті стрічки, з розташуванням шару полімерної матриці тільки на їх поверхні;

- препреги тканини та однонаправлені волокнисті стрічки, повністю просочені полімером матриці;

- термопластичні ламінати – це форма матеріалу, в якому від 1 до 24 шарів армуючого матеріалу, просоченого термопластичним сполучним, об'єднані у плоскі листи.

У обмеженій кількості зварні конструкції із ТПК використовуються в авіації вже давно та літають протягом десятиліть. На даний час авіавиробники найбільше застосовують терморезисторне зварювання (*resistance welding*) та індукційне зварювання (*induction welding*) полімерних матеріалів, використовують, також, ультразвукове зварювання (*ultrasonic welding*), лазерне зварювання (*laser welding*) та зварювання з непрямим нагрівом (*conduction welding*) [7].

Суть терморезисторного зварювання полягає у тому, що тепло виробляється за допомогою плоского закладного резистивного елемента, який розташований на межі розділу та залишається всередині зварного шва. Електричний струм, що пропускають крізь резистивний елемент, створює тепло та розплавляє термопластичний полімер, робочий тиск зовні на деталі сприяє утворенню зварного з'єднання після вимкнення струму та затвердіння розплавленого полімеру (рис.1). Закладні елементи, зазвичай у вигляді стрічки, виготовляють з металевої сітки або електропровідної вуглецевої тканини.

На авіасалоні в Берліні у 2018 р. компанія Premium AEROTECH (Аугсбург, Німеччина) представила демонстраційну модель гермошпангоута A320 Airbus (Тулуза, Франція). Гермошпангоут

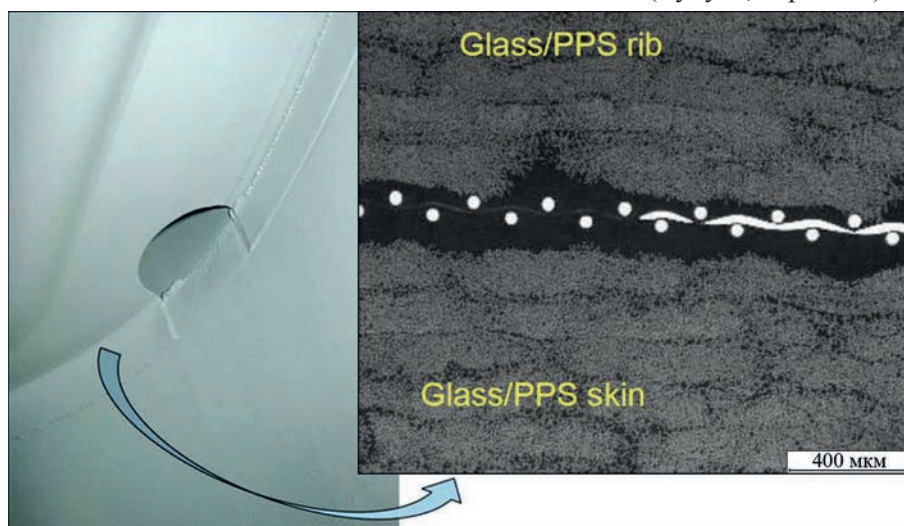


Рис. 1. Терморезисторне зварне з'єднання металевою сіткою корпусної деталі та ребра жорсткості, виготовлених із композиту поліфеніленсульфід/скловолокно [8]

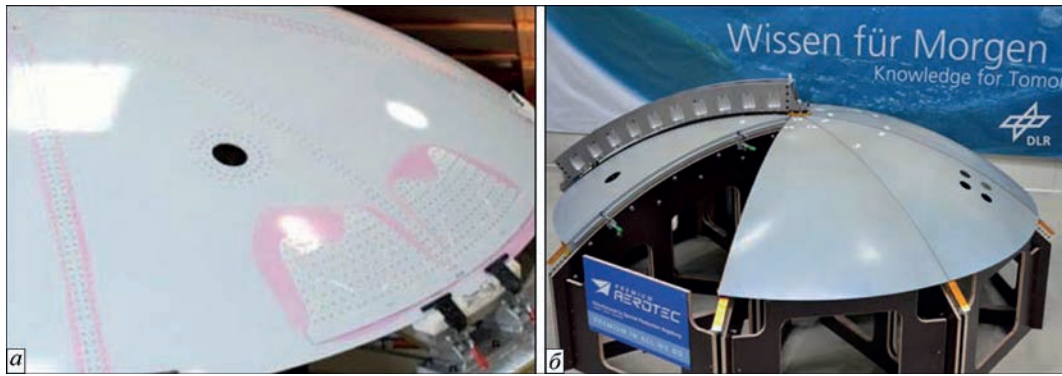


Рис. 2. Демонстраційна модель гермошпангоута Airbus A320: а – діюча версія із алюмінію з великою кількістю заклепок; б – зварна демонстраційна модель без заклепок зі «зварювальним мостом»

складається із восьми штампованих сегментів на основі ТПК вуглетканина/PPS, з'єднаних методом терморезисторного зварювання. На демонстраційній моделі Premium AEROTEC довжина зварних швів складала біля 1,5 м.

Виготовлений за допомогою зварювання термопластичний композитний гермошпангоут A320 пропонує рішення без заклепок у порівнянні з існуючою алюмінієвою конструкцією (рис. 2). Використання зварювання в даному випадку дозволяє економити вагу, час та вартість позиціонування та свердління отворів, а також вартість кріплення. Закладними елементами при зварюванні слугували стрічки із вуглецевого волокна.

Важливим елементом терморезисторного зварювання є робочий тиск, який необхідно прикласти до деталей, щоб отримати гарне з'єднання. Для деталей невеликого розміру робочий тиск зазвичай створюють за допомогою робота-маніпулятора, для великих деталей необхідно створювати спеціальну оснастку, яка забезпечить рівномірний тиск вздовж усього зварного шва. У даному випадку робочий тиск забезпечував вигнутий металевий «зварювальний міст», розроблений Premium AEROTEC. Він обертається займає положення над кожним із восьми зварних швів та створює рівномірний робочий тиск за допомогою десяти пневматичних циліндрів, розташованих на ньому [9].



Рис. 3. Виробництво рулів висоти та рулів напрямку методом індукційного зварювання із ТПК вуглеволокно/PPS для реактивного літака Dassault Falcon 5X

При індукційному зварюванні котушка, що живиться змінним електричним струмом великої частоти, переміщується вздовж лінії зварювання та індукує вихровий струм в електропровідних волокнах вуглецевого композиту. Для генерації вихрового струму в вуглецевих волокнах використовується змінна напруга частотою до 1 МГц. ТПК на основі скловолокна, яке не проводить електричний струм, непридатні для індукційного зварювання [10].

Компанія KVE Composites допомогла впровадити технологію виробництва рулів висоти та рулів напрямку з використанням індукційного зварювання для літаків Gulfstream G650 та Dassault Falcon 5X [11] (рис. 3).

Компанія Composite Integrity (Porquette, Франція) використала альтернативний підхід та розробила технологію «динамічного індукційного зварювання», яка використовується для з'єднання стрингерів та оболонок фюзеляжу на основі односпрямованої вуглецевої стрічки та РЕКК в компанії STELIA Aerospace (Тулуза, Франція). Оскільки індукційні вузли, що генерують вихровий струм при зварюванні матеріалів з односпрямованими стрічками, відсутні, то було розроблено спеціальну багатопроточну індукційну котушку. У 2016 р. Composite Integrity застосувала технологію індукційного зварювання для виробництва люків доступу до паливних баків із ТПК у літаку Airbus A220 (рис. 4).

KVE Composites показала, що використання люків, виготовлених зварюванням із ТПК, дозволяє економити витрати. Навіть невеликі літаки можуть мати до 60 подібних панелей доступу, при цьому усі вони мають різну форму та виготовляються з використанням композитної сендвічної конструкції з серцевиною із стільниковим заповнювачем. За допомогою зварювання усі панелі доступу можуть бути виготовлені на одній виробничій ділянці. При цьому не має потреби обробляти сердечник – використовуються компоненти, подібні до конструктора «LEGO» – плоскі листи та штамповані ребра жорсткості, які зварюються між



Рис. 4. Люки доступу паливного бака для вузьких літаків Airbus A220, виготовлені з ТПК компанією Aviascomp з використанням технології індукційного зварювання, розробленої компанією KVE Composites

собою та утворюють різні форми. Зварювальні інструменти відносно дешеві у порівнянні з тими, що використовуються сьогодні. При використанні зварювання можливо виготовити з ТПК усі різноманітні панелі доступу літака з витратами на обладнання не більше 100 тис. дол. США, що є суттєвою економією [11].

У 2015 р. компанія Composite Integrity почала роботу над проектом STELIA Arches TP та розробила обладнання для індукційного зварювання вигнутих деталей, розміром із фюзеляж літака (рис. 5). Процес зварювання названо «динамічним», тому що роботизована установка зварює стрингери по довжині фюзеляжу, індукційна котушка рухається при зварюванні по трьом координатам, включно з вертикальним напрямком  $z$ . Стрингери та обшивка в демонстраційній моделі

STELIA мають змінну товщину. Алюмінієва направляюча слугує затискним пристроєм та запобігає зміщенню стрингера відносно обшивки при зварюванні. В демонстраційній моделі робочий тиск прикладався через два ролика на зварювальній головці, які розміщались над котушкою. Під час зварювання ролики проходять вздовж стрингера, поруч із рейкою – фіксатором, у той час, як котушка рухається по лінії шва. В даний час запатентовано нову індукційну зварювальну головку, яка використовує один ролик та покращує механічні властивості зварного шва. Установка також оснащена пристроєм для охолодження зварного шва, який подає повітря на поверхню з'єднання, доводить його температуру до рівня нижче межі кристалізації та запобігає ризику розходження елементів шва після зняття робочого тиску [9].

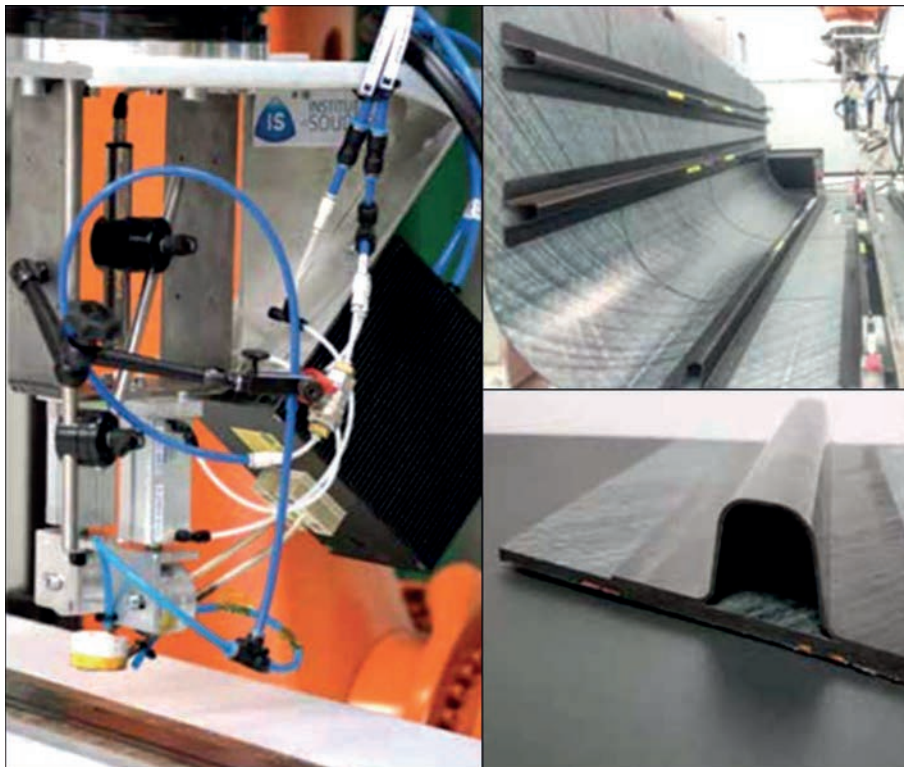


Рис. 5. Розроблена компанією Composite Integrity індукційна котушка та технологія зварювання стрингерів на основі односпрямованого вуглепластика та РЕКК з обшивкою

Компанією GKN Fokker накоплено значний досвід у застосуванні ще одного із розповсюджених способів зварювання деталей із ТПК – ультразвукового (УЗ). Установка для УЗ зварювання включає електричний генератор високочастотних (20...40 кГц) коливань, пьезоелектричний перетворювач та сонотрод, який контактує з поверхнею деталі та забезпечує нагрів та розплавлення полімерної матриці під дією механічних УЗ коливань. Цей метод традиційно застосовувався для зварювання точкових або невеликих за довжиною зварних швів [11].

У літаках Gulfstream використовували УЗ зварювання для з'єднання більше ніж 50 000 полімерних деталей, виготовлених литтям під тиском з ТПК панелями підлоги. Хоча це і точкове зварювання, але УЗ спосіб дуже швидкий та високоавтоматизований. Кронштейни фюзеляжу літака часто з'єднані заклепками або болтами з великими конструкціями, виготовленими із терморезистивного композиту. УЗ зварювання дозволяє забезпечити дуже гарне з'єднання кронштейнів, які часто виготовлені з неармованих термопластів.

Було, також, продемонстровано УЗ зварювальну головку DLR-центру (Аугсбург, Німеччина), встановлену на промисловому роботі KUKA та призначену для зварювання гермошпангоута із ТПК літака A320 як альтернативу терморезисторному зварюванню (рис. 6). Механічні випробування на L-відрив та порівняння із міцністю механічних з'єднань показали багатообіцяючі результати.

Спеціалісти із Технологічного університету Делфта (TU Delft, Делфт, Нідерланди) у своїй доповіді на конференції «31st Technical Conference, ASC» у 2016 р. заявили, що ультразвукове зварювання можна поширити на протяжні шви шляхом утворення безперервної лінії суміжних зварних точок, що частково перекриваються. Таке безперервне УЗ зварювання з отриманням послідовних

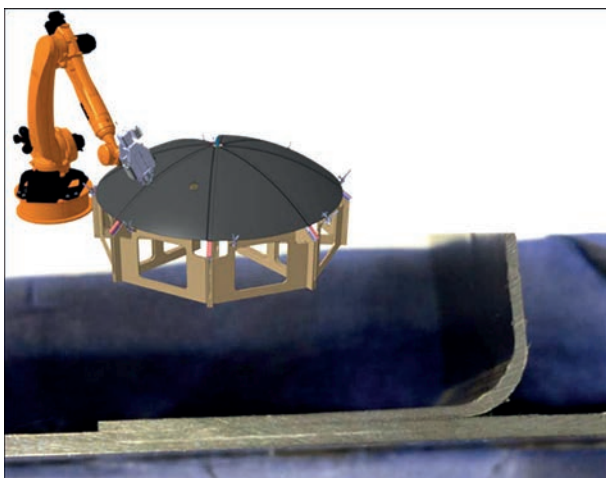


Рис. 6. Ультразвукова зварювальна головка DLR-центру та зразок зварного з'єднання із ТПК на основі односпрямованого вуглеволокна та РЕКК для випробувань на L-відрив [9]

точок у лабораторних умовах використовували для виготовлення з ТПК демонстраційної моделі панелі планера Clean Sky EcoDesign (рис. 7) [12].

Багато литих полімерних кронштейнів літака Fokker прозорі для лазера. Тому існує великий потенціал у використанні лазерного зварювання для закріплення цих кронштейнів на конструкції фюзеляжу з вуглепластика без необхідності свердління отворів. Тип армування та товщина ламінату впливають на якість зварного шва, однак, компанія LZH продемонструвала гарні результати із лазерного зварювання ламінатів із PPS та PEI, армованих скловолокном.

Компанія LZH запатентувала лазерну технологію та стала лауреатом премії JEC World Innovation Award 2018 у категорії аерокосмічних застосувань для «Модульних термопластичних панелей жорсткості», де штампована сітка жорсткості на основі термопластичного вуглепластика приварюється лазером до композитної оболонки [11].

Компанія GKN Fokker, як альтернативу індукційному, розробила нову технологію зварювання нагрітим інструментом з непрямим нагрівом. Нагрітий інструмент за принципом «праски» прикладається до зовнішньої поверхні однієї з деталей та прогріває її наскрізь із розплавленням термопласту та частковим розплавленням матеріалу нижньої деталі. Метод аналогічний відомому способу термоімпульсного зварювання полімерних плівок. Використовується малоінерційний нагрівач, завдяки чому прогрівання та охолодження якого займає всього декілька секунд. Оскільки прогрівається одразу увесь інструмент, час зварювання не залежить від довжини шва, він однаковий і для довжини 0,5, і 10 м. На виставці JEC 2014 були представлені панелі фюзеляжу з ТПК, виготовлені за допомо-

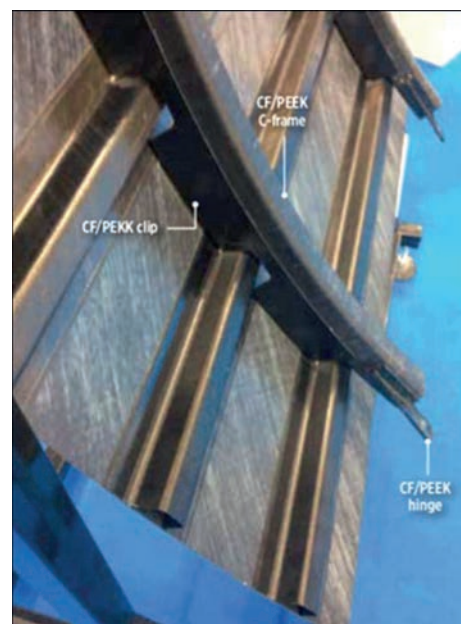


Рис. 7. Послідовне ультразвукове точкове зварювання елементів, виготовлених із ТПК вуглепластик/РЕКК

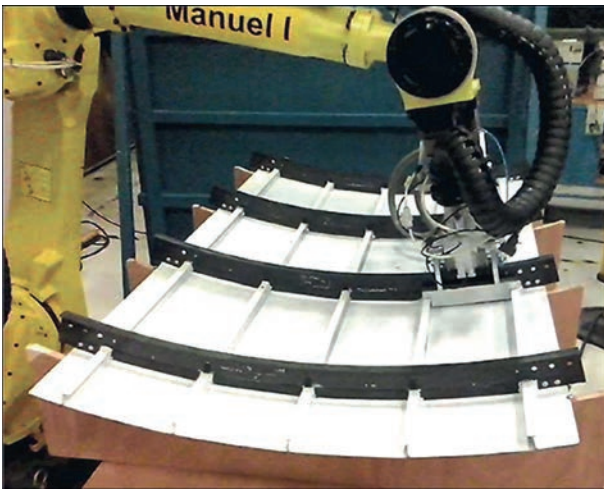


Рис. 8. Роботизована головка для зварювання елементів стрингерів фюзеляжу нагрітим інструментом із непрямим нагрівом гою нагрітого інструменту. Цей метод може добре працювати при зварюванні стрингерів довжиною 6...10 м з обшивкою фюзеляжу (рис. 8) [11].

Ключовим елементом для впровадження технології зварювання при виготовленні з ТПК конструкцій фюзеляжу літака є можливість контролювати процес зварювання та керувати їм у реальному часі. У даний час процеси зварювання контролюються цифровим способом зі збереженням усіх даних, однак, на порядку денному перехід до лінійного керування процесом з використанням контролю температури. Вважається, що розробка таких технологій для терморезисторного та індукційного зварювання потребує декількох років, а для УЗ – може з'явитись вже досить швидко. Моніторинг процесу послідовного точкового УЗ зварювання можливий на основі аналізу кривих потужності та зсуву, які видаються зварювальним апаратом та дозволяють швидко визначити оптимальні параметри зварювання. Спеціалісти авіаційної галузі вважають, що запуск у виробництво зварних великих елементів фюзеляжу літака, а, можливо, та всього зварного фюзеляжу, що не має механічних криплень, відбудеться у найближчі часи [11].

У майбутньому перспективним є також впровадження в авіаційну галузь і адитивних технологій, які на сьогодні розвиваються швидкими темпами



Рис. 9. БПЛА на 80 % 3D надрукований з полімерних матеріалів

та входять у виробничі процеси багатьох галузей промисловості [13]. В авіабудуванні та аерокосмічній галузі проектування, розробка та виробництво складних і замінних деталей є однією з актуальних частин сучасного та майбутнього застосування технологій 3D друку полімерними матеріалами [14]. Головна причина цьому – можливість суттєвого зменшення ваги деталей, виготовлених шляхом 3D друку, при збереженні їх експлуатаційних характеристик [15]. Також деталі, створені методами 3D друку, все більше використовуються і при виробництві БПЛА (рис. 9) [16].

### Висновки.

Значну частку конструкцій сучасних літаків виготовляють із термопластичних полімерних композитних матеріалів на базі поліетеркетонів, поліетеріміду та поліфеніленсульфіду. Для з'єднання деталей з цих матеріалів застосовують терморезисторне, індукційне, ультразвукове, лазерне зварювання та спосіб зварювання нагрітим інструментом з непрямим нагрівом. Основними напрямками удосконалення процесів зварювання та виробництва у цій галузі вважають перехід до керування процесом у реальному часі з використанням контролю температури та застосування адитивних технологій.

### Список літератури/References

1. Ківа Д. (2012) *Авіаційна галузь на крилах науки*. Віче, 21. <http://veche.kiev.ua/journal/3366/>  
Kiva, D. (2012) *Aviation sector on science wings*. Viche, 21. <http://veche.kiev.ua/journal/3366/> [in Ukrainian]
2. Беліков С.Б., Волчок І.П., Мітяєв О.А., Плескач В.М., Савченко В.О. (2017) *Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд). Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 1*. <http://nmt.zntu.edu.ua/article/view/131033/126779>  
Belikov, S.B., Volchik, I.P., Mityaev, O.A., Pleskach, V.M., Savchenko, V.O. (2017) *Composite materials in aircraft construction (Review)*. In: *New materials and technologies in metallurgy and machine building, 1*. <http://nmt.zntu.edu.ua/article/view/131033/126779> [in Ukrainian].
3. Chris Red (2014) *Thermoplastics in Aerospace Composites Outlook, 2014-2023*. Composites World, 1. <https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023>
4. W. D. Callister Jr., D. G. Rethwisch (2015) *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*, Wiley; 5th Ed., 960.  
<https://www.tencatecomposites.com/resources/datasheets>
5. <https://www.porcher-ind.com>
6. Da Costa A. P., Botelho E. C., Leali Costa M., Narita N. E., Tarpani J. R.. (2012) *A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications*. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4, 3, 255-265. [http://www.jatm.com.br/papers/vol4\\_n3/JATMv4n3\\_p255-266\\_A\\_Review\\_of\\_Welding\\_Technologies\\_for\\_Thermoplastic\\_Composites\\_in\\_Aerospace\\_Applications.pdf](http://www.jatm.com.br/papers/vol4_n3/JATMv4n3_p255-266_A_Review_of_Welding_Technologies_for_Thermoplastic_Composites_in_Aerospace_Applications.pdf)
7. Offringa A. (2016) *Thermoplastic composites in aerospace. Breakthrough Technologies for Advanced Manufacture*, Nottingham. [http://www.sampe.org.uk/assets/documents/pdfs/AS2016/Presentations/AS2016\\_01\\_Arnt\\_Offringa\\_Fokker.pdf](http://www.sampe.org.uk/assets/documents/pdfs/AS2016/Presentations/AS2016_01_Arnt_Offringa_Fokker.pdf)
8. Gardiner G. (2018) *Welding thermoplastic composites*. *Composites World*, 9, p. 50 – 63. [https://sc.edu/about/centers\\_institutes/mcnair/documents/composites\\_world\\_september.pdf](https://sc.edu/about/centers_institutes/mcnair/documents/composites_world_september.pdf)

10. Ahmed T.J., Stavrov D., Bersee H.E.N., Beukers A. (2006) *Induction welding of thermoplastic composites—an overview*. *Composites Part A*, t. 37, 10, 1638-1651. <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/induction-welding-of-thermoplastic-composites-an-overview-ps031YzeOD>
11. Gardiner G. (2008) *New horizons in welding thermoplastic composites* <https://www.compositesworld.com/blog/post/new-horizons-in-welding-thermoplastic-composites>
12. Palardy G., Villegas I. F. (2016) Smart Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites. *Proceedings of the American Society for Composites – 31st Techn. Conf., ASC*. <https://pure.tudelft.nl/portal/files/12482685/1816.pdf>
13. *Aerospace 3D Printing Market Size, Share & Industry Analysis, By Vertical (Printers and Materials), By Industry Type (UAV, Aircraft, and Spacecraft), By Application Type (Engine Components, Space Components, and Structural Components), By Printer Technology Type (DMLS, FDM, CLIP, SLA, SLS and Others), and Regional Forecast 2019-2026*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/aerospace-3d-printing-market-101613>
14. Joshi, Sunil & Sheikh, Abdullah. (2015). *3D printing in aerospace and its long-term sustainability. Virtual and Physical Prototyping*. **10**, 1-11. 10.1080/17452759.2015.1111519. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2015.1111519?journalCode=nvpp20>
15. *3D printing in aviation – advantages and areas of application* <https://www.mototok.com/blog/3d-printing-in-aviation-advantages>
16. *TOP 10 3D Printing in Aeronautics* <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-aeronautics-010320184/>

## WELDING OF THERMOPLASTIC POLYMER COMPOSITES IN THE AVIATION INDUSTRY (A REVIEW).

M.V. Iurzhenko<sup>1</sup>, M.V. Korab<sup>1</sup>, R.V. Kolisnyk<sup>1</sup>, O.P. Masiuchok<sup>1</sup>, A.S. Andreev<sup>2</sup>, V. Petropolsky<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Ukraine, Kyiv.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Antonov Company, 1, Akademika Tupoleva Str., 03062, Ukraine, Kyiv, E-mail: [support@antonov.com](mailto:support@antonov.com)

The volume of polymer composite structures in the aircraft industry is steadily increasing. Polymer composites based on thermosetting mats are traditional in this field, but it is important to use new thermoplastic composites (TPKs), which have several advantages over thermosetting ones. The use of thermoplastic composite materials makes it possible to actively use welding processes in the production of structures, which significantly increases the productivity of work and reduces their cost. The most used in the aircraft industry are 3 types of heat-resistant polymers of the class of polyarylene - polyether ether ketones (PEEK and PEKK), polyetherimide (PEI) and polyphenylenesulfide (PPS). Aeronautical structures are characterized by a large variety and complexity of forms, that's why almost all known methods of plastic welding are involved for joining. The resistance welding of polymeric materials using embedded elements made of metal mesh or carbon fabric is actively used. Inductive welding technology is suitable for joining structures made of conductive carbon composites. Ultrasonic welding, laser welding, and indirect-heated hot-welding are also used in aircraft engineering. Nowadays, welding processes are usually digitally controlled with permanent data storage, but currently the agenda is to move to linear process control using temperature monitoring. This paper, based on the materials of European publications, presents examples of the application of different welding methods in the manufacture of structures made of modern polymer thermoplastic composites in the aviation industry. 16 Ref., 9 Fig.

*Keywords: polymer composites, thermoplastics, welded joints, resistance welding, induction welding, ultrasonic welding.*

Надійшла до редакції 13.02.2020

Національна академія наук України  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

**XXIII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ**  
**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ**  
**та**  
**МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**  
**14–18 вересня 2020**  
**Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»**

Генеральний спонсор  
ПрАТ «УкрНДІНК»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ  
Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50  
[journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
[posypaiko.yurii@gmail.com](mailto:posypaiko.yurii@gmail.com)  
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2020>