

ЗВАРНІ КОНСТРУКЦІЇ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Т.М. Лабур

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Наведено приклади сучасних легких конструкцій з алюмінію та його сплавів. Показано діапазон їх застосування у різних галузях машинобудування. Різноманітність конструкцій відображає технологічні можливості та форми реалізації унікальних властивостей цього матеріалу. Проаналізовано тенденції світового виробництва та споживання таких конструкцій. Відмічено, що поява більш досконалих сплавів із відповідним набором фізико-механічних і технологічних властивостей, а також раціональний вибір способів їх нероз'ємного з'єднання забезпечують високу якість швів і надійність зварної конструкції. Представлені приклади наглядно ілюструють той факт, що ефективність легких конструкцій визначається функціональними вимогами до виробів, зварюваністю обраного алюмінієвого сплаву та рівнем технології його з'єднання за умов мінімальних витрат і строках виготовлення. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: алюміній та його сплави, способи зварювання, зварні з'єднання, легкі зварні конструкції, фізико-механічні та технологічні властивості, якість швів, надійність, умови експлуатації

Вироби з алюмінію та його сплавів на даний час заповнили ринок товарів. Вони широко використовуються в багатьох галузях машинобудування, а також цивільного і промислового будівництва [1–9]. Традиційно використовуються конструкційні матеріали на алюмінієвій основі в літальних апаратах. Галузю їх застосування є військові, пасажирські та транспортні літаки. Застосовуються вони також у виробках ракетно-космічної техніки (до 80 % за вагою). Особливий статус алюмінієві сплави мають у конструкціях наземних транспортних засобів (автомобіле- та вагонобудуванні), річковому та морському суднобудуванні. При цьому незалежно від сфери застосування зварних конструкцій використовуються єдині характеристики, які визначають їх ресурс (табл. 1).

В авіабудуванні ефективність застосування алюмінієвих сплавів загальновідома. Порівняно дешеві, відмінно оброблювані, міцні алюмінієві сплави добре зарекомендували себе в авіації минулого ХХ століття. Вони залишаються основними авіаційними конструкційними матеріалами й на сучасному етапі та в подальшій перспективі. Створення нових моделей літальних апаратів аерокосмічної техніки нерозривно пов'язане з вирішенням трьох основних проблем машинобу-

дування: зменшення ваги, зниження вартості та підвищення експлуатаційних характеристик. Зниження ваги дозволяє зменшити матеріалосмітність конструкції апарату, сприяє збільшенню корисного навантаження та поліпшенню льотно-тактичних показників при скороченні матеріальних витрат на виробництво та експлуатацію [10–12]. Це сприяє пошуку альтернативних основним аерокосмічним матеріалам на алюмінієвій основі – Д16, Д19, В95 і В96, 1201, які традиційно використовуються в конструкції планера літаків цивільного флоту. Підраховано, що зниження маси цивільного літака на 1 кг дозволяє заощадити 125...165 л палива на рік, а за весь термін його експлуатації економія споживання становить 3,0...4,8 млн дол. [9]. Широкі можливості в цьому напрямку відкрив новий клас високоміцних алюмінієвих сплавів, що містять літій.

Сучасні літаки експлуатуються переважно в умовах інтенсивних та екстремальних навантажень, тому основні вимоги, які висувуються до їх матеріалів, включають повний спектр аеродинамічних умов, вплив навколишнього середовища, безпеку польоту та вартість. При польоті використовують несучі поверхні конструкції для створення у повітряному середовищі підйомної та

Таблиця 1. Характеристики, які визначають працездатність зварної конструкції

Експлуатаційні властивості	Види випробувань	Досліджувані характеристики
Здатність до деформування у холодному стані	Розтяг	Відносне подовження, рівномірне подовження
Здатність до зварювання (зварюваність)	Технологічні проби («рибій скелет», хрестоподібні зразки тощо)	Схильність до утворення гарячих тріщин, поверхня зламу
Опір розшаруванню	Розтяг у напрямку товщини	Звуження перетину зразка
Руйнування (крихке або в'язке)	Ударний вигин зразка з надрізом	Робота деформації
	Вигин зварного шва	Поверхня зламу, кут згину
	Розтяг або вигин зразків із надрізом	Температура страгування тріщини
	Випробування за механікою руйнування	$K_{1C}(K_{IC})$, $\delta_{1C}(\delta_{IC})$, J -інтеграл

Т.М. Лабур – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

© Т.М. Лабур, 2020

керуючої сил, а також силова установка, яка підтримує політ літака за допомогою енергії палива, що знаходиться на борту літака.

Правильний вибір матеріалу елементів конструкції може суттєво покращити вагові та льотно-тактичні характеристики літального апарату. Особливу увагу приділяють задоволенню вимог щодо забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції при мінімальній масі, масової ефективності матеріалу, яка визначається співвідношенням питомої міцності $\sigma_{\text{доп}}/\rho$ до вартості 1 кг матеріалу. Підвищення масової ефективності зварної конструкції залежить від досконалості напівфабрикатів і виду з'єднань її елементів, що визначається не тільки конструктивними завданнями, але й технологічними можливостями матеріалу. Проектувальники конструкцій пред'являють до матеріалу, крім зварюваності, вимоги забезпечення його зварних з'єднань високої питомої міцності та пластичності при наявності найбільшої в'язкості руйнування. Саме це дозволяє продовжувати виконувати завдання польоту при наявності пошкоджень. З огляду на зростаючу швидкість літаків і підвищення при цьому температури зовнішніх панелей, алюмінієві сплави повинні мати також високу термостійкість та стійкість до термоциклювання в умовах експлуатації. Створення орієнтаційних космічних експресів, багаторазових апаратів, космопланів пов'язане з потребою в матеріалах, які мають, поряд з хорошою зварюваністю та тепловою стійкістю, високу якість при наднизьких температурах.

Герметичні відсіки літальних апаратів є штампозварними конструкціями, які складаються з листової оболонки товщиною 1,5...3,0 мм зі звареними в стик шпангоутами та фланцями, отриманими механічною обробкою об'ємних штампвок із заданим напрямом волокна [13–16]. Деталі з поволок застосовуються у виняткових випадках. Це пов'язано з тим, що на полицях шпангоутів, які приварюються до оболонки, та на фланцях товщина металу становить всього 2...3 мм. При несприятливому розташуванні волокна напівфабрикату ця зона може бути негерметична, що в складних умовах експлуатації може призвести до передчасного руйнування всієї конструкції. Для цих конструкцій використовують сплави:

- В96 (7075), призначений для деталей, які повинні мати високу статичну міцність;
- Д16-Т (2024) – для деталей, які повинні мати високу міцність від втоми;
- сплави спеціального призначення (7175, 7050, 7150, 7475, 2124, 2224, 2324), тобто майже всі наявні конструкційні сплави алюмінію.

Створені за останнє десятиліття нові алюмінієві сплави спільно з іншими конструкційними ма-

теріалами відкрили шлях до появи конструкцій з більш досконалішими аеродинамічними формами [17–19]. При цьому зварні конструкції не тільки легкі та міцні, але й характеризуються високою надійністю та безпекою експлуатації літальних апаратів. Сучасні моделі літаків і ракет дозволили освоїти нові тактико-технічні характеристики, які забезпечують цивільному повітряному транспорту необхідну економічність, а військовій авіації – високу ефективність. Загальна тенденція подальшої розробки таких апаратів пов'язана з освоєнням областей високих швидкостей польоту та робочих температур конструкції. У найближчій перспективі передбачається створення гіперзвукових літальних апаратів зі швидкостями польоту $M = 5 \dots 7 \dots 10$ км/хв.

Для вирішення цих задач відпрацьовуються різні концепції. Наприклад, для створення цільнозварних конструкцій передбачається можливість подальшого підвищення якості, надійності та строку експлуатації виробу шляхом застосування нових високоміцних легких сплавів, способів зварювання, сучасної методології проектування та виготовлення зварних вузлів. Реалізація такої концепції базується на виготовленні зварних орєбрених панелей крила, які мають значну жорсткість і мінімальну питому вагу, елементів фюзеляжу, шасі та інше. Це передбачає суттєву економію металу, зниження маси конструкції при заміні механічних з'єднань зварними.

Традиційно залучені матеріали на основі алюмінію замінюють більш досконалішими за складом та властивостям. Оскільки головна задача досконалості конструкцій літаків на найближчі роки полягає в зниженні ваги, підвищенні ресурсу та витривалості при відповідних рівнях міцності, надійності та економічній ефективності, тому постійно проводяться дослідження, які дозволять розкривати нові резерви підвищення експлуатаційних характеристик, і тим самим збільшувати їх конкурентоспроможність порівняно з іншими конструкційними матеріалами.

Яскравим прикладом політики активного оновлення конструкції є літак Боїнг 777Х. Він зібрав найбільш перспективні розробки у галузі матеріалів, технологічних процесів і операцій. Для верхньої поверхні крила, де найбільш важливими показниками є характеристики статичної міцності, застосовується високоміцний алюмінієвий сплав, розроблений фірмами «Боїнг» та «Алкоа» – сплав 7055-Т77 з границею плинності 640 МПа. Нижня поверхня крила виготовлена з покращеного складу сплаву 2324-Т39, який має високі значення характеристик міцності та втоми. У фюзеляжі застосований сплав 2524-Т3 з високими значеннями показників міцності, втоми та тріщиностійкості.

Лідером застосування нових перспективних матеріалів на сьогодні є літак А-380, який було створено в Європі (рис. 1). Він розрахований на 555 пасажирів, що на третину більше, ніж у основного конкурента – «Боїнг-747». Перший у світі двоповерхневий (або двопалубний) літак має чотири двигуни. Його довжина – 73 м, розмах крилів – 79,8 м, висота – 24 м. Лайнер здатен літати без посадки та дозаправки 15 тис. км. Для верхньої поверхні конструкції крила використовують високоміцний сплав 7055-Т77, для нижньої поверхні – покращений склад сплаву 2324-Т39. Для верхньої частини фюзеляжу застосовують сплав 2524-Т3, у нижній частині – зварювальний корозійностійкий сплав 6013-Т6. Оперення літака та центроплану крила виготовляють із композиційних матеріалів. Заміна матеріалу дозволила зменшити вагу конструкції та підвищити технологічність її виготовлення.

В російських конструкціях літаків широко представлені сплави двох систем легування – Al-Cu-Mn та Al-Zn-Mg-Cu. Для зовнішньої обшивки фюзеляжу та несучих бокових і нижніх поверхонь крила, які піддаються втомному навантаженню, використовують сплав Д16-Т, а для силових елементів фюзеляжу (шпонок, стрингерів) та обшивки верхньої несучої поверхні крилець, на які діють усадкові напруження – сплав В96 (7075). Зараз проводять розробки на основі традиційних сплавів з метою покращення їх міцності, в'язкості та властивостей втоми.

Для зменшення маси машин однією з важливих передумов є досконала технологія виробництва. Окрім термічної, механічної та пластичної обробки вона включає ефективні способи зварювання. Хоча вони у виробництві літальних апаратів відрізняються малою продуктивністю, високою вартістю обладнання, водночас, при цьому забезпечують високу надійність з'єднання та здатність протистояти жорстким умовам експлуатації. До числа таких способів з'єднання типових елементів з алюмінієвих сплавів відносять дугове зварювання металевим плавким електродом в середовищі захисного газу. Воно не знайшло широкого застосування в аерокосмічній промисло-



Рис. 1. Літак А-380 на зльоті

вості, оскільки не забезпечує достатньо високих механічних властивостей з'єднання та необхідного рівня надійності. Тим не менш, даний спосіб з'єднання алюмінієвих сплавів є головним при зварюванні підвісних відсіків для пального та окислювача ракет різного класу.

Наприклад, при виготовленні конструкції баку з алюмінієвих сплавів 2014 і 2219 ракети Saturn-V найбільшу перевагу отримало дугове зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисного газу. Були виготовлені зварні конструкції корпусу ракетних двигунів та паливні баки ракет із алюмінієвих сплавів із використанням технології дугового зварювання. Надійність з'єднань забезпечувалася шляхом створення ефективного відводу тепла позаду дуги, що значно знизило залишкові напруження та деформацію з'єднань [5].

При виготовленні елементів багаторазового космічного корабля Space Shuttle широке застосування знайшла технологія плазмового зварювання (рис. 2) з перемінною полярністю дуги, опрацьована на фірмі Hobart Brothers. Метод спеціально розроблено для зварювання товстих профілів з алюмінієвих сплавів, які використовуються для підвісних паливних відсіків кораблів типу Shuttle (рис. 3). Найбільше ефективним виявився термічний цикл при режимі: імпульс зворотного струму 15...20 мс, прямого – 2...5 мс; сила прямого струму при цьому на 30...50 А вища, ніж зворотного. Це створює умови концентрованого нагрівання основного металу, що дозволило скоротити кутову деформацію зварного з'єднання.

Для з'єднання стрингерів з обшивкою в літаках серії Airbus 318 і 380 як альтернативний варіант клепаним з'єднанням застосовують лазерну технологію [15]. При зварюванні фюзеляжу винищува-

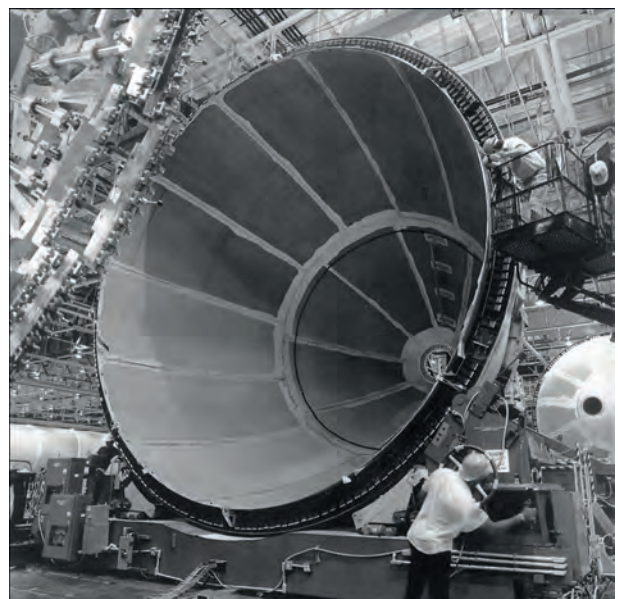


Рис. 2. Зварювання купола зовнішнього бака для палива космічного корабля багаторазового використання Space Shuttle (США)

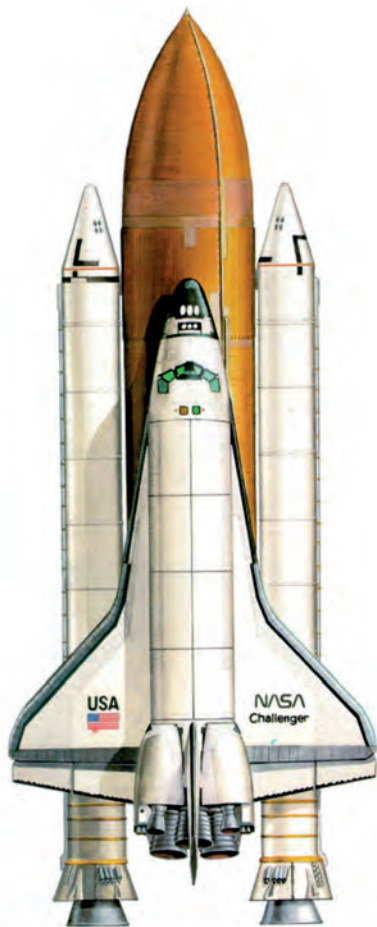


Рис. 3. Зовнішній вигляд базового паливного відсіку кораблів типу Space Shuttle

ча F-22 замість клепанних конструкцій використовували електронно-променеве зварювання [10]. Найбільший обсяг впровадження мають дифузійне та електронно-променеве зварювання, а також комбінований спосіб зварювання тертям з перемішуванням [17–19]. Основними вимогами до технології є висока якість з'єднання, забезпечення мінімального ризику в умовах експлуатації виробу та допустима вартість виробництва.

Комплексна технологія обробки алюмінієвих елементів та їх з'єднання дозволила фірмі Boeing виготовити бак для рідкого кисню та паливний відсік стартового прискорювача ракети-носія серії Delta. Конструкція баку, який завантажується кри-

огенним паливом, займає значну частину габаритів літального апарата. Відсік стартового прискорювача складається з двох типів баків довжиною 12 та 8,4 м, а також проміжного циліндра довжиною 4,8 м і діаметром 2,4 м.

Зараз проводяться підготовчі роботи до запуску ракети Delta-VI. Баки для неї планують виготовити з алюмінієвого сплаву 2598. Оскільки бак має значні габарити, то його зварювання планується виконати у вертикальному положенні. При цьому бак буде переміщуватися відносно платформи зі зварювальною установкою. Компанія Boeing розробила такий технологічний процес та очікує збільшення числа комерційних запусків супутників за допомогою ракет серії Delta та планує випускати до 100 баків на рік. Окрім цього, компанія проводить широкомасштабні дослідження експлуатаційних властивостей зварних з'єднань та відбувається розробка нової технологічної документації. Така стратегія виробництва зумовлена розширенням сфери застосування новітніх способів зварювання для виготовлення зварних конструкцій на цивільних та військових заводах.

Активно ведуться роботи також із освоєння криволінійних з'єднань. Для виготовлення надлегких підвісних відсіків багаторазового повітряно-космічного апарату типу Space Shuttle, НАСА (рис. 3) використана технологія зварювання тертям з перемішуванням для з'єднання листів товщиною від 2 до 5 мм сплаву 2198 системи Al–Li. Такі елементи конструкції служать для розміщення компонентів палива та зазвичай мають довжину 47 м і діаметр 8,38 м. Результати дослідження якості швів підтвердили, що дана технологія може повністю замінити плазмові та електронно-променеві способи зварювання при роботі з алюмінієвими сплавами [12, 13]. Низька величина погонної енергії зварювання створює необхідні для формування шва теплофізичні умови, тобто реалізуються умови, за яких деформується твердий розчин, що позитивно виявляється на значеннях фізико-механічних властивостей з'єднань, ступеня втрати міцності металу в зоні нагрівання, деформації зварних виробів.

Спосіб зварювання тертям з перемішуванням було відпрацьовано й для з'єднання нового алюмінієво-літійового сплаву – C458 (Al–1,8Li–2,7Cu–0,3Mg–0,08Zr–0,3Mn–0,6Zn), який характеризується більш низькою щільністю ($0,026 \text{ кг/см}^3$) порівняно з іншими алюмінієво-літійовими сплавами та високим модулем пружності, ніж сплав 2219. Отримані результати дослідження зварюваності та фізико-механічних властивостей зварних з'єднань дозволяють прогнозувати, що завдяки заміні традиційних сплавів на новий сплав C458 у конструкції паливного баку багаторазового корабля можна

заощадити витрати на виробництво та обслуговування від 2 до 4 млн дол. протягом 400 польотів.

Перспективний аналіз (до 2020–2030 рр.) використання матеріалів на алюмінієвій основі в літальних апаратах свідчить про те, що ці сплави збережуть лідерство в конструкціях літаків, наприклад, планера біля 80 %. Головна тенденція їх розвитку, яка ґрунтується на підвищенні міцності та зниженні питомої ваги сплаву, в подальшому зростатиме. Водночас необхідно відмітити, що підвищення зазначених характеристик, зазвичай, базується на ускладненні хімічного складу сплаву, необхідності оптимізації режимів термічної обробки та інших технологічних заходів, включаючи й зварювальні процеси, які викликають зниження пластичних і ресурсних властивостей матеріалів. Тому створення якісних нероз'ємних конструкцій з нових матеріалів на алюмінієвій основі є значною науковою та технологічною проблемою, яка спонукає до широкомасштабного дослідження та освоєння нових способів зварювання алюмінієвих сплавів із урахуванням того, що зварні з'єднання повинні працювати з високим ступенем надійності у складних умовах експлуатації.

Аналогічна тенденція перспектив застосування нових способів зварювання спостерігається також у **галузі суднобудування**. Основним конструкційним матеріалом при будівництві швидкісних суден для експлуатації в умовах морських і річкових басейнів є алюмінієві сплави групи 5XXX системи легування Al–Mg–Mn. Вони мають порівняно зі сталлю суттєві переваги – високу корозійну стійкість в морській воді. Крім того, алюмінієві корпуси не заростають мушлями, що зберігає обтікання судна та збільшує швидкість проходження в міжремонтний період, а це знижує затрати на експлуатацію та пофарбування. Тим самим забезпечуються умови, необхідні для роботи у водному середовищі (рис. 4). Раніше в суднобудуванні широко використовували різні способи зварювання плавленням, особливо зварювання плавким електродом. За останні роки в даній галузі машинобудування відмічається значний інтерес до впровадження технології зварюванням тертям. При цьому використовуються усі типи зварного з'єднання: стикові, таврові, кутові тощо. Найбільший розвиток цей спосіб зварювання отримав у Скандинавських країнах Європи.

Поширенню технології зварювання тертям з перемішуванням сприяла успішна розробка зварювального обладнання, що було розроблено фірмою ESAB (Швеція) за ліцензією, придбаною в Технологічному інституті зварювання (Великобританія). Відповідно до даних, поданих фірмою ESAB, створення серії установок SuperStir базується на використанні стандартних машин модульного типу. Така промислова стратегія дозволила розробити ти-

повий ряд зварювального обладнання для з'єднання різних груп алюмінієвих сплавів. Розроблені на модульній основі установки охоплюють весь діапазон параметрів робочого простору під габаритні розміри зварювальних панелей від 0,5×1,5 до 10×20 м. До складу обладнання входять спеціальні пристрої затискувачів із зубчатим механізмом переміщення, зварювальна машина та комп'ютерна система керування. Зварювання виконують в автоматичному режимі. Параметри процесу зварювання реєструються завдяки вбудованій системі оперативного контролю.

Одна з установок SuperStir була випробувана норвезькою суднобудівною компанією Marine Aluminium при виготовленні корпусів швидкісних катерів та великих корпусних поромів з алюмінієвих панелей розміром 6×16 м. При цьому була

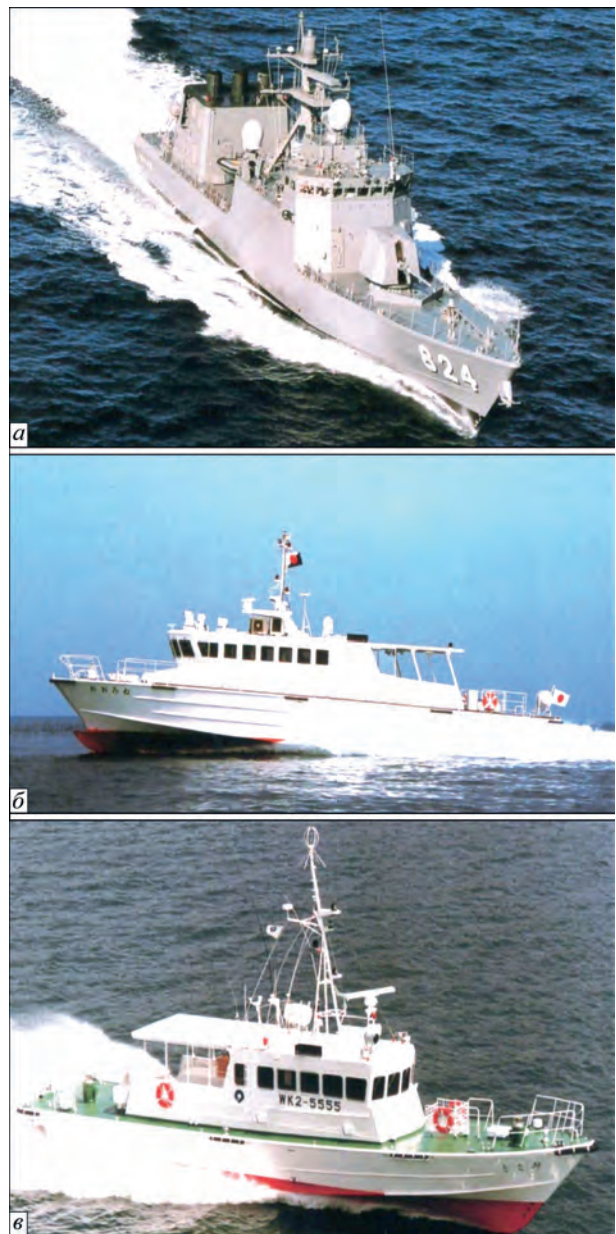


Рис. 4. Приклади використання алюмінієвих сплавів в суднобудівельних конструкціях (Японія): а – прикордонний катер; б – катер для прогулянки; в – малий риболовецький траулер

проведена оцінка експлуатаційних властивостей зварних з'єднань сплавів 6082 і 7108 та визначена можливість використання алюмінієвих панелей, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням, для обшивки морських суден. Отримані результати показали, що зварні зразки після очищення від продуктів корозії та подальшого розтягу мали високу антикорозійну стійкість в умовах циклічних випробувань у камері з морським середовищем протягом 1000 год при вологості 98 %, а також температурі 50 °C й вище. Високі властивості при балістичних випробуваннях показали зварні з'єднання сплаву 2519-T87, отримані з використанням зварювання тертям з перемішуванням. Вони дозволили фірмі General Dynamics Land Systems у співдружності з Edison Welding Institute зварювати алюмінієві плити розміром 1219×121×31,8 мм для створення нового покоління конструкцій морських броньованих амфібій [15].

Шведська фірма SAPA разом з Технологічним інститутом зварювання (Великобританія) розробила та впровадила у виробництво зварні панелі для холодильних установок швидкого заморожування [14]. До зварних з'єднань цих панелей застосовуються підвищені вимоги щодо щільності швів, оскільки вони утримують холодні речовини, небезпечні для людини та навколишнього середовища. Ця ж фірма, використовуючи зварювання тертям з перемішуванням, опанувала виробництво зварних панелей для станцій попереднього стискання рибної маси перед заморожуванням. Конструкція подібної станції складається з 17 панелей товщиною до 30 мм із загальною довжиною шва 16 м. Обладнання заводу SAPS Profil (Швеція) дозволяє зварювати з пресованих профілів довгомірні та широкі панелі розміром 14,5×3,0 м для виготовлення палуб суден, кришок і бокових частин вагонів залізничних потягів та метро.

У галузі автомобілебудування привабливими якостями алюмінієвих сплавів для конструкторів є: зниження маси автомобіля та, відповідно, зменшення використання палива; заміна дефіцитної міді та корозійностійкої сталі; більш широкі сировинні можливості порівняно з іншими металами; висока ефективність переробки (рециклювання) алюмінієвих фрагментів і деталей після закінчення строку експлуатації автомобілів. Спеціалістами підраховано, що кожний кілограм алюмінію, використаний в конструкції автомобіля, дозволяє протягом строку служби машини заощадити 7...10 л палива.

Аналіз динаміки зростання обсягів застосування алюмінію та його сплавів в легкових автомобілях країн ЄС і США показують, що вже в 2000 р. загальна маса вузлів і деталей з алюмінію складала 120...150 кг або біля 10 % усієї маси авто-

мобіля. Прикладом перспективних можливостей застосування алюмінієвих сплавів є автомобіль «Porsche 928», в конструкції якого майже 300 кг алюмінієвих деталей, що складає біля 20 % загальної маси автомобіля. Фірмою «Ford Motor Company» розроблена нова модель автомобіля «Synthesis-2010», конструкція якого виготовлена в основному з алюмінію, що забезпечує практично його повне рециклювання. Зварний алюмінієвий несучий кузов має масу на 46 % меншу, ніж відповідний кузов, виконаний зі сталі. Автомобіль має трьох циліндровий двигун з алюмінієвим блоком циліндрів.

Широко використовуються алюмінієві сплави в конструкції кузовів автомобілів класу «Ауді-А8», «Лотус», «Експедшен» («Форд»), «Навігатор», тощо. Зазначені моделі автомобілів відносять до високого класу спортивних або так званих позашляховиків (рис. 5). Обсяг виробництва таких автомобілів не перевищує 0,1...0,2 % загального обсягу випуску легкових автомобілів у світі.

Найбільш поширеними вузлами та деталями автомобілів з деформованих і литих алюмінієвих



Рис. 5. Приклади використання алюмінієвих сплавів в легкових автомобілях: а – «Феарді» Z33; б – «Скайнлайн» V35

сплавів є каркас (рама), теплообмінники (радіатор і обігрівач), бампер, двері, кришка багажника та капота, кузов, диски коліс, блок циліндрів, поршні, профілі зовнішнього та внутрішнього оброблення, кабіни кузовів і борти вантажних автомобілів, паливні баки (рис. 6). В закордонних марках легкових автомобілів каркасної конструкції для рам та інших елементів застосовуються пресовані профілі з алюмінієвих сплавів. Так, автомобільна компанія AOS/APC проінформувала про широке впровадження в процесі виготовлення зварної рами автомобіля з алюмінієвого профілю метода зварювання тертям з перемішуванням.

В табл. 2 подано основні типи зварних з'єднань та способи зварювання, які знайшли широке застосування при виготовленні елементів конструкції автомобілів з алюмінію та його сплавів. Їх реалізація у виробництві автомобілів була зумовлена рішенням цілого ряду виробничих процесів. До їх числа слід віднести: відсутність алюмінієвих сплавів оптимального складу для виготовлення кузовів вантажних і легкових автомобілів; низька границя плинності сплавів порівняно зі сталю; відсутність серійної технології штампування автомобільних заготовок, особливо тонкостінних виробів, підготовки алюмінієвого напівфабрикату під зварювання (лазерне, контактне, дугове) і подальшого нанесення захисних покриттів. Сьогодні розвиваються нові конструктивно-технологічні, металургійні та організаційні заходи, які в основному направлені на подальше зниження маси кузова та затрат палива, покращення екологічних показників, високу надійність та подовжений ресурс, а також високу комфортність і безпеку при експлуатації автомобіля.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку автомобілебудування показує, що сьогодні відмічаються три основних напрямків застосування алюмінієвих сплавів при виготовленні кузовів автомобілів. Перше – це всі деталі та вузли кузова в автомобілях з несучим кузовом. Друге – це навісні деталі та вузли капотів, кришок багажників, люків, знімальних крил, дверей, паливних баків, силових балок переднього та заднього бамперів, систем вихлопу тощо. Третє – це деталі та вузли автомобілів рамної конструкції кузова. Останній напрямок особливо широке розповсюдження знайшов у США та Європі. Для цього широко застосовуються алюмінієві сплави систем легування Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Zn–Mg, сплави 5083, 5456, 5556, 6061, 6013, 7033. В Росії застосовуються їх аналоги: АВ, АД33, АД37, АМг2, 1515, 1523. Для силових конструкцій та вузлів автомобілів широко використовуються сплави систем Al–Mg і Al–Mg–Sc: 1535, 1545, 1570, АМг6, для систем вихлопу – сплави 1419, САП-3, 1151, для силових важелів торсіонів, штанг – сплав 1970, АК6, 1460, 1933, 1973.

Алюміній та його сплави також застосовуються в транспортних засобах сільськогосподарського призначення, включаючи виробництво вантажних автомашин для перевезки тварин, рефрижераторів, муковозів, спеціалізованих кузовів автомобілів і причепів для транспортування мінеральних добрив. Окрім зниження маси кузова машин та збільшення корисного навантаження, що знижує транспортні затрати та економить паливо, при цьому забезпечується висока гігієнічність та подовження строку експлуатації. Впроваджені також зварні конструкції цільноалюмінієвих бортових і самоскидних платформ, які використовують у міжнародних перевозках легкових автомобілів. Також розроблено конструкції напівпричепів з

Алюміній та його сплави також застосовуються в транспортних засобах сільськогосподарського призначення, включаючи виробництво вантажних автомашин для перевезки тварин, рефрижераторів, муковозів, спеціалізованих кузовів автомобілів і причепів для транспортування мінеральних добрив. Окрім зниження маси кузова машин та збільшення корисного навантаження, що знижує транспортні затрати та економить паливо, при цьому забезпечується висока гігієнічність та подовження строку експлуатації. Впроваджені також зварні конструкції цільноалюмінієвих бортових і самоскидних платформ, які використовують у міжнародних перевозках легкових автомобілів. Також розроблено конструкції напівпричепів з



Рис. 6. Приклади використання алюмінієвих сплавів у вантажних автомобілях: а – «Toyota» FCHV; б – надлегкий вантажний автомобіль FU з алюмінієвими рамами; в – кузов самоскиду з алюмінієвого сплаву

Таблиця 2. Основні типи з'єднання та способи зварювання алюмінієвих сплавів при виготовленні елементів конструкцій автомобілю

Елемент конструкції	Сплав	Товщина, мм	Спосіб зварювання	Основний тип з'єднання
Крила передні та задні	АМг2, сплави системи Al-Mg-Sc (1523)	1,0...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна)	
Двері	АМг2, АД37, АМг4, 1523, 1535	1,0...2,0	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова	
Капоти, кришки	АМг2, АМг4, АД37, сплави системи Al-Mg-Sc (1523, 1535)	1,0...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова	
Паливний бак	АМг2, АМг4, АМг6, сплави системи Al-Mg-Sc (1523)	1,5...2,5	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	
Система вихлопу газів	1419, 1151, САП	1,2...1,8	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	
Силові елементи, лонжерони, бампер	АМг4, АМг6, АД37, сплави системи Al-Mg-Sc (1535, 1545, 1570)	1,5...3,0	Лазерна, контактна (точкова або шовна), точкова дугова, ручна дугова, автоматична аргонодугова	

бортами та решітками для тентів з алюмінієвих профілів, напівпричепів-фургонів загального використання, напівпричепів-рефрижераторів різної вантажності.

Арсенал зварювальних технологій постійно зростає. Поряд зі зварюванням CO₂-лазером (потужністю до 5 кВт) та Nd:YAG-лазером (потужністю до 6 кВт) плит з алюмінієво-магнієвих сплавів товщиною 0,5...1,5 мм, розпочато використання гібридних лазерно-дугових технологій (лазер + MIG), які дозволяють знизити витрати електроенергії та вимоги щодо точності складання стиків між елементами конструкції. Вимоги до якості підготовки кромки, точності складання стику для зварювання алюмінієвих сплавів включають: наявність строго прямолінійних кромки без задирів при хвилястості не більш 0,04 мм. Зазор в стику між кромками товщиною 0,5...3,0 мм не має перевищувати 0,08 мм. На деяких підприємствах і фірмах США експлуатуються нові установки для виконання технології електронно-променевого зварювання без вакууму [19]. В Японії проводяться дослідження щодо застосування зварювання тонколистового (0,8...1,5 мм) алюмінію та його сплавів для автомобілебудування. Вибір процесу зварювання при організації виробництва базується на аналізі їх технологічних можливостей. Знач-

ну увагу має вартість в залежності від типу та обсягів виробництва.

В залізничному транспорті алюміній та його сплави застосовують у вигляді штампованих і пресованих заготовок при виготовленні буксів вагонів [20]. Маса буксів при цьому знижується вдвічі. Демпфуючі властивості алюмінію сприяють зменшенню на 10 % напруження на рейки та елементи конструкції вагону. Завдяки високій корозійній стійкості та хорошій зварюваності алюмінію, його з успіхом використовують при виготовленні цистерн для перевезення концентрованої азотної кислоти, молока, виноматеріалів. В інтер'єрі пасажирських вагонів широко використовують профілі та інші напівфабрикати. Труби з внутрішнім плакуванням з корозійностійкого алюмінієвого сплаву використовують для систем водопостачання та нагрівання вагонів. Термін їх служби в 10 раз більший, ніж моноталевих, що виключає необхідність ремонту систем за період експлуатації. В даний час розглядається можливість використання в конструкціях вагонів великогабаритних панелей з алюмінієвих сплавів шириною до 800 мм в якості елементів силових конструкцій. Значну перевагу мають алюмінієві транспортні контейнери усіх типів порівняно зі сталевими виробами. Їх маса вдвічі менше

сталей, а корозійна стійкість значно вища, вони більш довговічні та економічні в експлуатації, оскільки мають більш високе корисне навантаження і не потребують фарбування.

В будівництві громадських та промислових споруд основою для застосування алюмінієвих сплавів систем легування Al–Mg, Al–Mg–Si, Al–Mg–Zn, Al–Cu–Mg стали висока міцність, відсутність порогу холодноламкості, мала щільність, висока пластичність, хороша стійкість проти корозії, відсутність іскроутворень при ударі, антимагнітні властивості, висока сейсмостійкість, бактерицидність, а також хороший зовнішній вигляд конструкції [15–18]. Алюмінієві будівельні конструкції не схожі на сталеві. Найбільш економічними виявилися плоскі листи, іноді об'ємні деталі та пресовані стержні, які разом складають просторові системи.

Широке застосування отримали дугові технології неплавким і плавким електродами, автоматичне зварювання по слою флюсу. В останні роки спостерігається використання імпульсно-дугового зварювання, при якому напруження та струм змінюються за відповідним законом, що дозволяє отримувати якісні шви в різних просторових положеннях під час виготовлення конструкцій складної конфігурації.

Слід зазначити, що не дивлячись на переваги застосування алюмінієвих конструкцій, пошук раціональних технічних рішень їх виготовлення збільшує вартість проектування в декілька разів порівняно зі сталевими. Це зумовлено необхідністю глибокого опрацювання конструктивних схем і форм перетинів конструкційних елементів і проведення натурних випробувань окремих зразків для встановлення ресурсних і корозійних властивостей виробів. Водночас значні витрати на проектування окупаються термінами експлуатації таких конструкцій, оскільки мінімальна вартість зварного виробу за участю окремих елементів з алюмінієвих сплавів обернено пропорційними витратам при опрацюванні проекту.

Експлуатація алюмінієвих конструкцій має свою специфіку. Витрати при цьому йдуть, головним чином, на те, щоб забезпечити систематичне спостереження за станом поверхні елементів конструкцій та ділянок їх поєднання з деталями з інших матеріалів, які бажано відповідним чином ізолювати від алюмінію. При відсутності агресивних середовищ (галоїдів або лугів) алюмінієві конструкції не потребують витрат на ремонт протягом 20...50 років.

Особливо ефективно застосування зварювальних алюмінієвих сплавів в спорудах, розташованих в Арктиці, Антарктиді, гірських місцевостях і пустелях. Це пов'язано зі здатністю сплавів

підвищувати міцність за умов низьких і криогенних температур, зберігаючи при цьому пластичність, яку вони мають при кімнатній температурі (20...25 °C).

Значний економічний ефект отримують від алюмінієвих сплавів при будівництві або реконструкції мостових переходів. В останньому випадку є можливість не тільки зберегти архітектурний облік мосту, але й збільшити потік руху транспорту. Не дивлячись на значну різницю в структурі алюмінію та бетону, алюмінію та армоцементу, що використовуються, основою є порівняно низький модуль пружності цих матеріалів, що дозволяє їх залучати до схем просторових армоцементних і залізобетонних конструкцій.

Таким чином, представлені приклади світового освоєння зварних легких конструкцій в різних галузях машинобудування свідчать про різноманітність технологічних можливостей та форм реалізації унікальних властивостей алюмінію та його сплавів. Вони відображають тенденції світового виробництва та споживання, які поширюють спектр їх використання шляхом удосконалення способів зварювання та розробки нових технологій з'єднання. Ефективність конструкцій визначається функціональними вимогами виробів, зварюваністю обраного алюмінієвого сплаву та рівнем технології його з'єднання при мінімальних витратах та термінах виготовлення. Поява більш досконалих сплавів із відповідними фізико-механічними та технологічними властивостями поряд із раціональними способами нероз'ємного їх з'єднання забезпечують високу якість швів і надійність зварної конструкції.

Аналогічний процес відбувається і в Україні. Але темпи його реалізації дуже повільні. Для інтенсифікації виробництва легких конструкцій необхідно промислове освоєння новітніх досягнень високотехнологічних процесів, включаючи зварювання. Це забезпечить зростання продуктивності виробництва зварних конструкцій при скороченні ручного труда, зниженні трудомісткості, поліпшенні екологічних умов при виготовленні типових елементів конструкцій, що відкриє перспективу створення нових зразків від аерокосмічної техніки до наземних і водних засобів, а також ефективних будівельних та мостових споруд з широким використанням зварних деталей та вузлів з алюмінієвих сплавів.

Список літератури/References

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология.
Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M., Bernadsky, V.N., Makovetskaya, O.K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].

2. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Teh N.J. (2006) Small joints make a big difference. *TWI Connect*, 143, 4, 1–7.
4. Aota K., Okamura H., Masakuni E. et al. (2001) Heat inputs and mechanical properties friction stir welding. *Proc. of the 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Kobe, Japan, 27–28 September*, pp. 453–457.
5. Norlin A. (2000) A century of aluminium – a product of the future. *Svetsaren*, 2, 31–33.
6. Dilthey U., Behr W. (2000) Elektronen-strahlschweißen in Atmosphäre. *Schweißen und Schneiden*, 8, 461–465.
7. Bierman B., Dierken R., Kupfer R. et al. (1992) Laser Beam Cutting and Welding of Al–Li sheets. *Sixth International Aluminium-Litium Conference, 1991, Garmisch-Partenkirchen. Informationsgesellschaft, Verlag*, pp. 1159–1164.
8. (1998) New Applications for TWBs – and Laser Welding. *Welding and Joining Europe*, 10.
9. Вильгельм М., Рацим К. (2008) Материалы и процессы как факторы прогресса в автомобилестроении. *Черные металлы*, 3, 33–38.
- Wilhelm, M., Ratsim, K. (2008) Materials and processes as factors of progress in motor industry. *Chyornye Metally*, 3, 33–38 [in Russian].
10. Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Афанасьева Л.Ф. (2003) *Мировая авиация на рубеже XX–XXI столетий. Промышленность, рынки*. Киев, КВІЦ.
- Krivov, G.A., Matvienko, V.A., Afanasieva L.F. (2003) *World aviation at the turn of the XX–XXI centuries. Industry, markets*. Kiev, KVITs [in Russian].
11. Дмитриев В.Г., Замула Г.Н., Коновалов В.В., Нестеренко Г.И. (2003) Приоритетные направления совершенствования материалов для конструкций перспективных самолетов. *Технология легких сплавов*, 1, 3–8.
- Dmitriev, V.G., Samula, G.N., Konovalov, V.V., Nesterenko, G.I. (2003) Priority directions of improvement of materials for prospective aircraft structures. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 1, 3–8 [in Russian].
12. Hibben M., Stemmiel F. (1999) Tailored Blanks aus Aluminium. *Blech Rohre Profile*, 42, 6, 394–397.
13. Ole T. Midling, Ljiana Djapic Oosterkamp, Jan Berasaas (1998) Friction Stir Welding Aluminium-process and applications. *Proc. 7th Int. Conf. on Joints in Aluminium (INALCO-98)*. TWI, Abington. Cambridge. UK. 15–17 April 1998.
14. Campbell G., Stotler T. (1999) Friction Stir Welding of Armour Grade Aluminium Plate. *Welding Journal*, 12, 45–47.
15. Yasuda K., Isizawa Y., Kitaura I. (1996) Study on Hybrid Joining Method Using TIG Arc Welding (Report 1). *Welding of light metals*, 34, 11, P. 537–543.
16. Wemah K. (2000) Equipment for Aluminium Welding. *Svetsaren*, 2, 11–13.
17. Jkura I., Nagisawa N., Iwata S., Kitamura K. (2014) Technological developments for realizing aluminium bridges. *Journal of Japan institute of light metals*, 54, 9, 380–387.
18. Okura I. (2003) Application of the Aluminium Alloys to Bridges. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 441–446.
19. Nakagomi T., Ichikawa Y. (2013) The Present Condition of Application of the Aluminium Alloys to a Construction Steel Frame. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 447–451.
20. Sakurai K. (2003) Report of the Aluminium Alloy Bridges in Europe and United States. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, 41, 10, 452–459.

WELDED STRUCTURES FROM ALUMINIUM ALLOYS

T.M. Labur

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Examples of modern lightweight structures from aluminium and its alloys are given. Their applications in different mechanical engineering sectors are shown. The structure diversity reflects the technological capabilities and forms of realization of unique properties of this material. Trends in world production and consumption of such structures have been analyzed. It is noted that appearance of more advanced alloys with the respective set of physico-mechanical and technological properties, as well as rational selection of the processes of their permanent joining, provide a high quality of welds and welded structure reliability. Presented examples clearly illustrate the fact that the effectiveness of lightweight structures is determined by functional requirements to products, weldability of the selected aluminium alloy and level of its joining technology provided the expenses and production time are minimum. 20 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: aluminium and its alloys, welding methods, welded joints, light welded structures, physico-mechanical and technological properties, weld quality, reliability, service conditions

Надійшла до редакції 06.11.2019

XII Міжнародна спеціалізована виставка
**КИЇВСЬКИЙ
ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК**

МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15
телеф. (044) 201-11-56, 201-11-55, 201-11-56
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
plst@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

**31 березня –
3 квітня
2020**

Генеральний інформаційний партнер: Ексклюзивний медіа-партнер: Технічний партнер:

**XIX МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2020**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

**24 - 27
листопада**

ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр
Генеральний інформаційний партнер: Ексклюзивний медіа-партнер:
Технічний партнер:

Міжнародний виставковий центр
Україна, 02002, Київ
Броварський пр-т, 15
«Льобережна»
телеф. (044) 201-11-55, 201-11-56, 201-11-58
e-mail: alexk@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua