

ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ЗВАРЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПАЛИВНИХ БАКІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

Л.М. Лобанов¹, О.П. Кушнар'єв², О.А. Мазур¹, Т.М. Лабур¹, І.Л. Снегір'єв², С.В. Пустовойт¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля». 349008, м. Дніпро, вул. Криворізька, 3. E-mail: info@yuzhnoye.com

При виготовленні космічних апаратів застосовується зварювання та інші споріднені технології. При створенні конструкцій ракет третього покоління особливу увагу приділяють проблемам підвищення показників надійності та безпеки польотів, що забезпечується шляхом раціонального використання в конструкції нових видів високоресурсних зварних з'єднань, які отримують шляхом впровадження ефективних способів зварювання. Здійснено аналіз виробництва традиційної (вафельної) конструкції та перспективної (стрингерної), з урахуванням економічної доцільності застосування способів зварювання. З точки зору економічної доцільності перспективно використання зварювання тертям з перемішуванням. При цьому можна очікувати значну економічну ефективність застосування технології зварювання тертям для виготовлення конструкцій паливних баків ракет-носіїв. Біблігр. 10, табл. 7, рис. 11.

Ключові слова: алюмінієві сплави, дугове зварювання, лазерне зварювання, гібридне лазерно-дугове зварювання, зварювання тертям з перемішуванням, економічні витрати, дослідження

Вступ. В даний час при виготовленні космічних апаратів широко застосовується зварювання та інші споріднені технології. Космічна промисловість пред'являє до них все більш високі вимоги, що пояснюється використанням нових конструкційних матеріалів, безперервним зростанням вимог до якості з'єднань, ускладненням умов їх експлуатації [1].

Вдосконалення конструктивних елементів об'єктів ракетно-космічної техніки висуває жорсткі вимоги і до технологічного процесу їх виробництва. Особливо при підготовці виробництва до випуску нових виробів ракетно-космічної техніки висуваються вимоги максимального скорочення термінів і зниження вартості підготовки виробництва [2]. Основним завданням при цьому є розробка і впровадження більш прогресивних технологій зварювання [3–5], а також проектування і виготовлення технологічного оснащення, тому що ефективність застосування зварювання при виготовленні об'єктів ракетно-космічної техніки багато в чому визначається технологічним устаткуванням і пристосуванням, які використовуються при здійсненні складально-зварювальних операцій. Це спонукає постійно вдосконалювати існуюче, створювати і конструювати унікальне зварювальне обладнання.

Проблематика. Сучасні об'єкти ракетно-космічної техніки експлуатуються переважно в умовах інтенсивних та екстремальних навантажень, тому до переліку основних вимог, які висуваються до таких конструкцій, включають повний спектр аеродинамічних збурень, вплив наднизьких температур і агресивність навколишнього середови-

ща, ризики в умовах польоту та вартість виробництва (табл. 1). При польоті ракети-носія для створення у повітряному середовищі підйомної та керуючої сил використовують несучі поверхні конструкції. Крім того, працює силова установка, яка підтримує висоту та тривалість польоту ракети за допомогою енергії палива, що знаходиться у відповідному баковому секторі.

Метою роботи було здійснити аналіз ефективності виробництва вафельної та стрингерної конструкції з урахуванням економічної доцільності застосування нових конструкційних матеріалів та різних способів зварювання: дугового, лазерного, гібридного лазерно-дугового, а також тертям з перемішуванням.

Матеріали й методи. Застосовано методи визначення економічної оцінки технологічного процесу, методи наукового спостереження, порівняння їх основних показників. При цьому використовували аналітичний метод та метод економіко-статистичного аналізу.

Результати та обговорення. Виробництво космічних літальних апаратів, перш за все, пов'язано з потребою в матеріалах [6], які мають високі механічні і ресурсні властивості в умовах наднизьких температур. До таких конструкцій відносяться герметичні резервуари для зберігання рідких компонентів палива. Конструкція баку, який наповнюється криогенним паливом, займає значну частину габаритів літального апарату. Його конструкція повинна відповідати наступним експлуатаційним вимогам:

– стійкість до зовнішнього нагрівання;

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

© Л.М. Лобанов, О.П. Кушнар'єв, О.А. Мазур, Т.М. Лабур, І.Л. Снегір'єв, С.В. Пустовойт, 2022

Таблиця 1. Основні вимоги до конструкцій ракетно-космічної техніки

Вимоги	Характеристики матеріалу
Навантаження	Міцність
Вібрація	Втома, фретінг, стирання
Температура	Повзучість, подовжена міцність, окислення, корозія, теплове розширення, теплопровідність
Навколишнє середовище	Загальна корозія, корозія під напругою, тиск пару
Маса	Щільність
Жорсткість	Модуль пружності, пластичність
Безпечність	Подовження, в'язкість, однорідність властивостей, надійність
Економічність	Вартість матеріалів, виробництва, технічне обслуговування, строки експлуатації

– достатню для збереження в холоді криогенного ракетного палива теплоізоляцію внутрішньої поверхні баку;

– здатність попереджати можливість втрат рідкого палива.

Відсік стартового прискорювача складається з двох типів баків різної довжини, а також проміжного циліндру. Його з'єднують з трьох типових елементів у вигляді панелей, які, зазвичай, виготовляються з алюмінієвих сплавів різної товщини. Панелі мають вафельну ромбовидну внутрішню поверхню. Суттєво покращити вагові та льотно-тактичні характеристики літального апарату дозволяє правильний вибір конструкції паливних баків. Особливу увагу приділяють задоволенню вимогам забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції за умов мінімальної маси, забезпечення масової ефективності матеріалу, яка визначається співвідношенням питомої міцності $\sigma_{\text{доп}}/\rho$ до вартості 1 кг матеріалу.

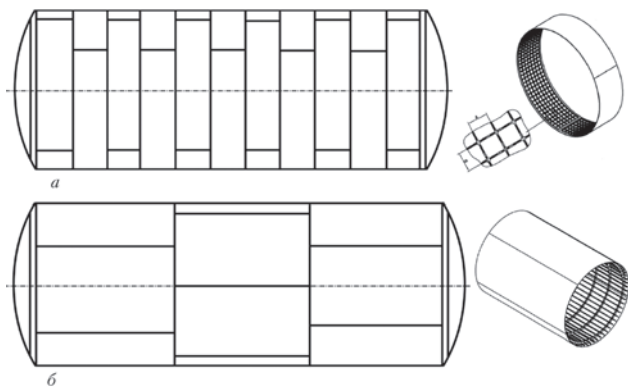


Рис. 1. Основні конструкції паливних баків: вафельна (а) та стрингерна (б)

Конструкції баку відносяться до штампозварних, товщина оболонки яких складає 3...5 мм. В процесі виготовлення такої конструкції одним з головних є вимога до рівня зварювальних напружень та деформацій. З цією метою зварювання виконують переважно в нижньому положенні. Для цього використовують спеціальне оснащення, яке передбачає вільну усадку швів в процесі зварювання, що визначається показником жорсткості зварного вузла та оснастки.

Для рішення цих задач відпрацьовуються різні концепції. Наприклад, для створення конструкцій баків передбачається можливість подальшого підвищення якості, надійності та строку експлуатації виробу шляхом застосування нових високоміцних легких сплавів, ефективних способів зварювання, сучасної методології проектування та якісне виготовлення зварних вузлів в умовах виробництва. Реалізація концепції базується на виготовленні зварних вафельних або стрингерних панелей баків, які повинні мати значну жорсткість і мінімальну питому масу при високому рівні конструкційної міцності. Вона передбачає суттєву економію металу, зниження маси конструкції баку.

Базовими аспектами таких розробок стали: покращення аеродинамічних властивостей, застосування нових конструктивних елементів, удосконалення технології виробництва, заміна матеріалів. Це забезпечило покращення тактико-технічних параметрів виробів: підвищення вантажопід'ємності, зниження питомого використання палива, збільшення дальності польоту та часу перебування конструкції у космічних умовах, що дозволило розширити спеціалізацію ба-



Рис. 2. Види ракетно-космічної техніки, створеної в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»

зових моделей зазначеної техніки шляхом створення нових модифікацій.

Поява сучасних моделей ракет-носіїв дозволила освоїти нові тактико-технічні характеристики, які забезпечують космічному транспорту необхідну високу експлуатаційну ефективність та економічність. Загальна тенденція розвитку конструкцій таких апаратів в основному пов'язана з освоєнням високих швидкостей та тривалості польоту, а також забезпеченням відповідних робочих температур конструкції (рис. 2).

Істотне значення у підвищенні масової ефективності зварної конструкції залежить від досконалості напівфабрикатів і якості виконання зварювання, що часто визначається не тільки удосконаленням окремих конструктивних елементів, але й опрацюванням технологічних можливостей матеріалу, який використовується. Проектувальники конструкцій пред'являють до них, крім зварюваності, вимоги забезпечення високої питомої міцності та пластичності зварних з'єднань при наявності достатнього рівня показника в'язкості руйнування. Саме це забезпечує умови довгострокового періоду виконання завдань космічного польоту навіть при наявності пошкоджень. З огляду на зростаючу швидкість літальних апаратів і підвищення при цьому робочої температури зовнішніх панелей, алюмінієві сплави та їх зварні з'єднання повинні виявляти також високу термостійкість та стійкість до термоциклювання в умовах експлуатації.

Наприклад, при виготовленні конструкції баку з алюмінієвих сплавів типу АМг6, 2219 (1201) ракети класу «Зеніт» широко застосовується технологія дугового зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисного газу. При використанні даного способу зварювання були виготовлені для різних моделей ракет-носіїв зварні конструкції паливних баків, підвесних відсіків для пального та окислювача ракет різного класу. Надійність з'єднань при цьому забезпечується завдяки використанню процесів зварювання трьохфазною дугою або неплавким електродом пульсуючою дугою. Використовують, крім того, для електронно-променевого зварювання джерела високої концентрації тепла. Всі зазначені способи зварювання поліпшують структуру з'єднань, збільшують міцність на 70...100 МПа та K_C – на 20...25 %. При цьому слід відмітити, що поліпшення властивостей досягається не тільки в металі шва, але й у найбільш слабкій зоні зварних з'єднань – на границі його сплавлення з основним металом.

Однією з важливих передумов зменшення маси космічних апаратів залишається необхідність використання досконалої технології виробництва. Хоча у виробництві літальних апаратів вони від-

різняються малою продуктивністю, високою вартістю обладнання, тим не менш, забезпечують високу надійність з'єднань та здатність конструкції протистояти жорстким умовам експлуатації. До числа таких способів з'єднання типових елементів паливного баку відносяться дугове зварювання алюмінієвих сплавів неплавким та плавким електродами в середовищі захисного газу. Воно не знайшло широкого застосування в світовій аерокосмічній промисловості, оскільки не забезпечує достатньо високих механічних властивостей з'єднання та необхідного рівня надійності. Тим не менш, даний спосіб з'єднання залишається в Україні одним з головних.

В теперішній час при створенні конструкцій ракет третього покоління особливу увагу приділяють проблемам підвищення показників надійності та безпеки польотів, а вони, як відомо, забезпечуються шляхом раціонального використання в конструкції нових видів високоресурсних зварних з'єднань, які отримують шляхом впровадження ефективних способів зварювання. Чим більш відповідальні функціональні задачі постають перед новими космічними апаратами, тем більше досконалішими повинні бути матеріали та технології їх обробки (термічної, механічної та пластичної), а також процеси зварювання. Розробка та виробництво таких конструкцій потребують інтенсивного розвитку зазначених технологій з урахуванням економічної доцільності. Це, відповідно, висуває ще більш складні технічні задачі перед науковцями та виробниками таких високотехнологічних апаратів.

Зараз в сучасному виробництві ракет-носіїв використовують паливні баки вафельного або стрингерного типу (див. рис. 1). У вафельній конструкції панелі обичайки складаються з плит, наприклад, з алюмінієво-магнієвого сплаву марки АМг6, який характеризується підвищеною міцністю при низькій питомій масі. Такий тип баків виготовляється за допомогою попередньої механічної обробки плити шляхом фрезування для отримання відповідно поздовжніх і поперечних ребер жорсткості. Одночасно при цьому плиту також готують до процесу зварювання. При фрезеруванні плити вимушено відбуваються значні втрати матеріалу у вигляді стружки, загальний об'єм якої досягає майже 60 %. Але є технологічна можливість її повторної переробки (рециклювання) металевих залишків.

З точки зору виконання швів при зварюванні така конструкція паливного баку і технологія його промислового виробництва знайшла широке застосування з огляду на спрощене здійснення. При складанні та зварюванні конструкції паливного баку вафельного типу зварні шви є стиковими, виконання яких відбувається впродовж по лінії контакту. Крім того, мають місце також кільцеві

шви при з'єднанні обичайок в циліндричну конструкцію баку. Такі шви переважно виконують за допомогою аргонодугового зварювання. Така технологія зварювання сплаву АМг6 розроблена та з успіхом використовується на різних підприємствах машинобудування, включаючи й завод «Південмаш». На рис. 3 представлені значення витрат на виконання процесу зварювання вафельних і стрингерних паливних баків.

Слід зауважити, що сплав АМг6 випускається тільки в РФ. На світовому ринку алюмінієвих сплавів присутній сплав марки АМг5, але він має менший рівень міцності. Тому виробництво з нього конструкційних елементів паливних баків потребує збільшення товщини напівфабрикату, що викликає зростання маси ракети-носія. Як результат відбувається підвищення витрат при виході на орбіту еквівалентного корисного вантажу.

Конструкція паливного баку стрингерного виду більш досконала, але потребує використання алюмінієво-мідних марок сплавів (типу 2219 або 1201), а також алюмінієво-літійових марок сплавів (типу 2195, 2198 або В1469). Ці сплави були розроблені для криогенного призначення, тобто для роботи за умов наднизьких температур космосу. Характерною ознакою зазначених сплавів є здатність металу до низькотемпературного зміцнення при збереженні високого рівня показників пластичності та в'язкості.

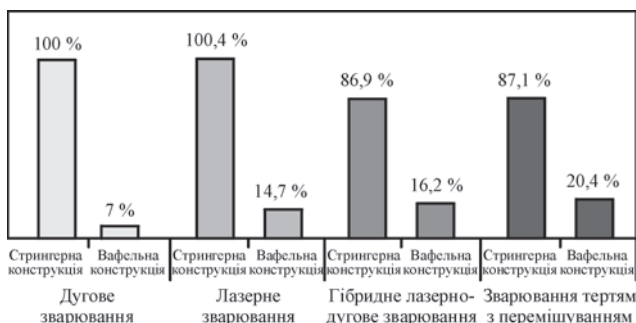


Рис. 3. Витрати на зварювання вафельних та стрингерних топливних баків (за 100 % прийнято витрати на дугове зварювання стрингерної конструкції)

тичності та в'язкості.

Кожна з розглянутих видів конструкцій паливних баків має свої технічні та технологічні недоліки та переваги (табл. 2).

Розвиток космічних послуг, висока вартість напівфабрикатів, а також залежність від імпорту поставок сплаву АМг6, 1201 та В1469 з РФ сприяли техніко-економічному аналізу доцільності застосування стрингерних конструкцій паливних баків і технології їх виготовлення, в яких втрати на придбання дороговартісного матеріалу знижені до мінімального рівня. Це дозволяє знизити праце- та енерговитрати зварювальних робіт, покращити тактико-технічні характеристики ракети та підвищити масу корисного вантажу, що виводиться на орбіту.

В теперішній час в ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» розроблено удосконалені конструкції перспективних моделей паливних баків сучасних ракет-носіїв, в яких використовуються принципово нові конструкторські рішення – елементи конструкції виконано з застосуванням стрингерів і шпангоутів з гнучо-зварних профілів. При виготовленні таких елементів повністю виключається операція фрезерування, а самі процеси здійснюються шляхом використання високотехнологічних способів зварювання. Об'єми зварювальних робіт при цьому в 10 разів підвищуються порівняно з аналогічним показником для конструкцій баку вафельного типу. Перехід на освоєння стрингерної конструкції паливного баку та технологічний регламент його виготовлення зумовлює проведення економічного аналізу різних способів зварювання, які при цьому доцільно використовувати, з метою оптимального вибору. При проведенні економічної оцінки технічних можливостей сучасних способів зварювання розглядалися умови реалізації як вафельної, так і стрингерної конструкцій паливного баку. Зазвичай при їх виготовленні використовуються відомі дугові способи зварювання плавким і неплавким електродами в інертному

Таблиця 2. Недоліки та переваги у вафельних та стрингерних конструкціях паливних баків

Вид конструкції	Переваги	Недоліки
Вафельна	<ul style="list-style-type: none"> – Менша трудомісткість складально-зварювальних робіт; – мала протяжність зварних швів; – шви – стикові (кільцеві та виконані вздовж орієнтації прокату напівфабрикатів); – менша потреба у спеціальному допоміжному зварювальному обладнанні; – незначний об'єм робіт щодо контролю якості зварних швів. 	<ul style="list-style-type: none"> – Великий об'єм робіт щодо механічної обробки (фрезерування) металу; – значний процент відходів дорого-вартісного матеріалу.
Стрингерна	<ul style="list-style-type: none"> – Менший об'єм робіт щодо механічної обробки (фрезерування) металу; – можливість використання гнутих профілів для виготовлення стрингерів і шпангоутів; – використання при виготовленні панелей обичайок тонколистових конструкційних матеріалів. 	<ul style="list-style-type: none"> – Висока трудомісткість складально-зварювальних робіт; – значна протяжність зварних швів; – необхідність використання спеціальних стэндів для складання та зварювання конструкцій; – великий об'єм робіт для контролю зварних швів.

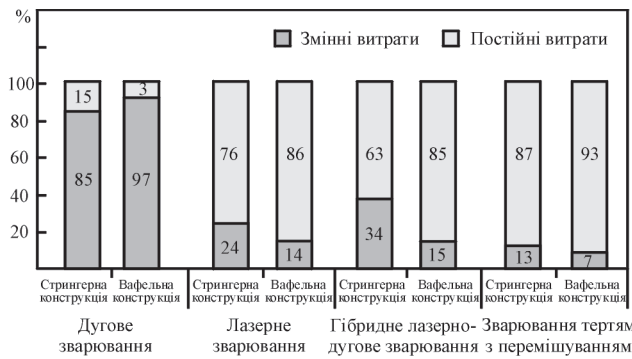


Рис. 4. Співвідношення перемінних і постійних витрат на виконання зварювання вафельних і стрингерних паливних баків середовищі аргону або гелію [3]. В останні роки розроблено технології лазерного та гібридного (лазерно-дугового) зварювання [7–9], а також зварювання у твердій фазі – тертям з перемішуванням [10]. Кожен з цих зазначених способів зварювання має свої технологічні переваги та недоліки, тому в якості методу їх ранжування була прийнята величина технологічних витрат на здійснення відповідного процесу зварювання.

Для цього був проведений технологічний аналіз здійснення цих способів, визначені економічні витрати на реалізацію процесу зварювання в ході виконання річної програми випуску відповідної техніки, більш аргументована величина можливої мінімальної рентабельності в загальному об’ємі виробництва та з урахуванням обраної кількості основного і допоміжного зварювального обладнання, необхідного технологічного оснащення та відповідних пристосувань (рис. 4).

Як показали результати аналізу, при виготовленні паливних баків стрингерної конструкції дуговим зварюванням з використанням присадних дротів з’являється значна протяжність (довжина) таврових і кутових швів, тобто в конструкцію додається значна маса металу, що наплавляється (табл. 3).

В такому разі у виробі можуть виникнути напруження та деформації. Для їх зниження в з’єднанні доцільно застосувати спеціальні стенди для створення умов бездеформаційного зварювання [4]. Слід також відзначити, що особливістю процесу виготовлення тонкостінних паливних баків стрингерної конструкції являється високий рівень термодформаційного впливу зварних швів, які послідовно накладаються при з’єднанні окремих елементів. Тому виникає необхідність використання спеціальних методів щодо зниження такого

Таблиця 3. Об’єми наплавленого металу при виготовленні одного комплексу паливних баків

Технологія зварювання	Маса наплавленого металу, кг
Дугова	325
Лазерна	113
Гібридна	150
ЗТП	35

впливу аж до повного їх попередження. Це можливо отримати шляхом використання попереднього навантаження зварних панелей за допомогою спеціально розроблених в ІЕЗ стендів, які пройшли випробування в суднобудівельній галузі та при створенні зразків окремих типових елементів ракетно-космічної техніки.

При виготовленні типових елементів космічного корабля широке застосування отримала технологія контактно-стикового зварювання. Метод було розроблено для зварювання шпангоутів значної товщини, які мають складну форму в попередньому перетині, а також при використанні підвісних конструкцій паливних відсіків. Найбільш ефективним виявився термічний цикл з використанням режиму неперервного оплавлення (рис. 5). Це забезпечує умови концентрованого нагрівання основного металу, що дозволяє скоротити кутову деформацію зварного з’єднання.

Для з’єднання елементів стрингерної конструкції баків можуть бути також використані технології лазерного або гібридного (лазерного + дугового) зварювання, що забезпечує зменшення розмірів зони термічного впливу та значне зниження деформацій зварного вузла [5]. Головна задача зазначених процесів зварювання полягає в максимальному наближенні фізико-механічних властивостей з’єднань з основним металом. Основними вимогами до технологій є отримання високої якості з’єднання матеріалів при зварюванні, а також забезпечення мінімального ризику руйнування конструкції при експлуатації виробів поряд з допустимою вартістю виробництва. Процес лазерного

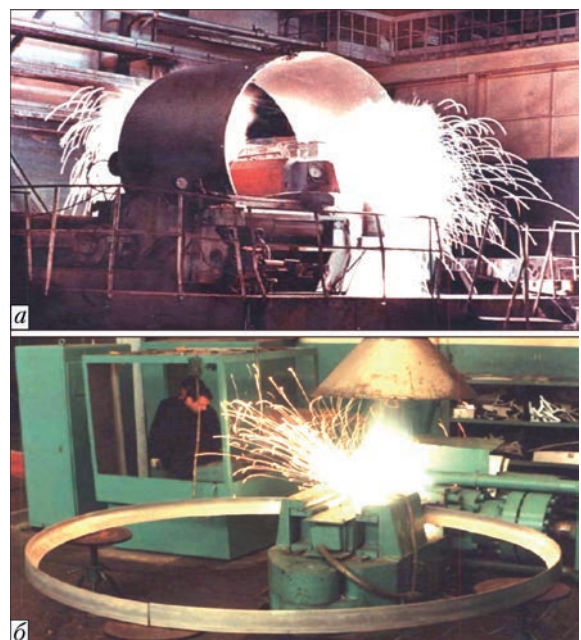


Рис. 5. Приклади використання контактно-стикового зварювання у виробництві фрагментів конструкцій аерокосмічної техніки з високоміцного сплаву АМгб: а – зварювання обичайки корпусу паливного баку; б – зварювання шпангоутів

зварювання відбувається без присадного металу. Кромки прямі, а зазор між ними максимальний (0,1...0,2 мм), тобто вимоги до підготовки металу до зварювання високі, а здатність заповнення зазору низька. Особливо це важливо при зварюванні конструкцій великої протяжності. Проблема була вирішена шляхом комбінації лазерного процесу та дугового з додаванням присадкового металу, що дозволило в 5...10 разів збільшити розміри зазорів між кромками, що зварюються.

Лазерне та гібридне зварювання відноситься до висококонцентрованих процесів з'єднання, тому при зварюванні додається менше погонної енергії у виріб. В результаті величини напруження і деформація, які відбуваються в зварних швах, менші. Це дозволяє при здійсненні процесів лазерного та гібридного зварювання відмовитися від застосування стендів для бездеформаційного зварювання. Крім того, при застосуванні цих способів зварювання маса наплавленого металу в 2...3 рази менша, ніж за умови дугового зварювання.

Розглянемо статті витрат на реалізацію процесу зварювання елементів паливних баків (табл. 4), коли необхідно виконати річну програму виготовлення такої конструкції. В загальному виді сумарні витрати складаються з постійних (на амортизацію та поточний ремонт) і перемінних витрат (на зварювальні матеріали, зарплату робітникам, електричну енергію для зварювання та вентиляцію повітря робочої ділянки зварювальника).

Вартість основного та допоміжного зварювального обладнання визначає величину постійних затрат на амортизацію та поточний ремонт, а також впливає на сумарні витрати для реалізації процесу зварювання при виконанні річної програми (рис. 6).

Доля постійних витрат для виконання лазерно-

го зварювання та зварювання третям з перемішуванням (ЗТП) в структурі загальних технологічних витрат на здійснення річної програми складає майже 76 і 87 % відповідно, а для гібридного зварювання – 63 %.

Наступною значною статтею витрат на виготовлення конструкції баку є витрати на придбання необхідної кількості зварювальних матеріалів. Їх використовують для отримання якісних зварних швів шляхом формування технологічного посилення. При дуговому способі доля витрат на такі матеріали в загальній структурі витрат для зварювання типових елементів баку в рамках річної програми становить 56 %. В результаті скорочення маси наплавленого металу при лазерному та гібридному зварюванні доля витрат на зварювальні матеріали становить відповідно 19 і 29 %.

Витрати на зарплату спеціалістам для здійснення лазерного та гібридного зварювання з відраху-

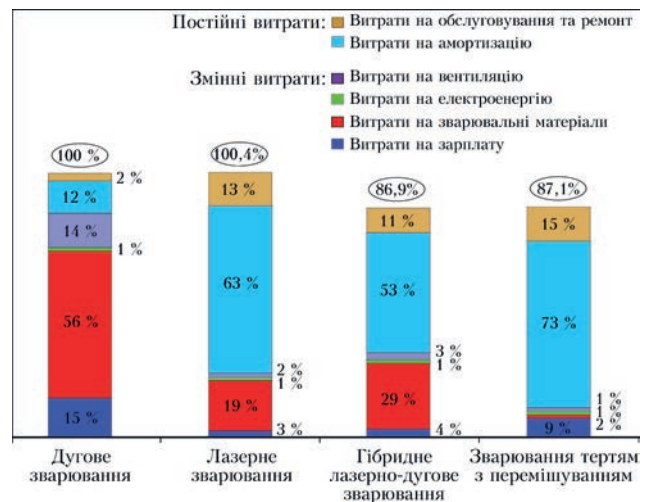


Рис. 6. Структура витрат на зварювання паливних баків стрингерної конструкції при виконанні річної програми, грн

Таблиця 4. Попередні розрахунки витрат на зварювання паливних баків стрингерної конструкції для виконання річної програми

Найменування витрат	Дугове зварювання		Лазерне зварювання		Гібридне лазерно-дугове зварювання		Зварювання третям з перемішуванням	
	грн.	%	грн.	%	грн.	%	грн.	%
Змінні витрати	12 101 803	85,0	3 472 641	24,3	4 574 261	37,0	1 573 843	12,7
Витрати на зарплату	2 147 324	15,1	389 320	2,7	469 660	3,8	1 097 322	8,9
Витрати на зварювальні матеріали (робочий інструмент)	7 911 550	55,6	2 711 898	19,0	3 598 679	29,1	239 000	1,9
Витрати на електроенергію	99 882	0,7	104 535	0,7	161 230	1,3	57 521	0,5
Витрати на вентиляцію	1 943 047	13,6	266 888	1,9	344 692	2,8	180 000	1,5
Постійні витрати	2 134 000	15,0	10 818 000	75,7	7 794 000	63,0	10 818 000	87,3
Витрати на амортизацію	1 779 000	12,5	9 015 000	63,1	6 495 000	52,5	9 015 000	72,7
Витрати на обслуговування та поточний ремонт	355 000	2,5	1 803 000	12,6	1 299 000	10,5	1 803 000	14,5
Витрати, усього	14 235 803	100	14 290 641	100	12 368 261	100	12 391 843	100



Рис. 7. Приклад обладнання HAGEMATIC 305 FSW з фрезерно-зварювальною головою STIRPOWER 300 для високошвидкісного фрезерування та ЗТП для з'єднання габаритних плоских секцій

ваннями в структурі витрат на зварювання річної програми дорівнюють 3 і 4 % відповідно, В абсолютних величинах вони в 4...5 рази менші порівняно з витратами на зарплату робочим, які володіють дуговими способами зварювання. У випадку зварювання тертям з перемішуванням затрати на зарплату в 2 рази нижче, ніж при дуговому зварюванні.

Затрати на електроенергію в загальній структурі витрат при виконанні річної програми незалежно від способу зварювання не перевищують 1,5 %.

Ще однією важливою статтею витрат, яку необхідно враховувати при економічній оцінці різних способів зварювання, є витрати на вентиляцію промислового приміщення зварювальної ділянки, а також підігрівання повітря, яке при цьому використовується. В структурі витрат найбільша її величина (14 %) спостерігається у випадку зварювання конструкції баку дуговим способом, оскільки при цьому виділяється найбільша кількість зварювального аерозолу в навколишнє середовище. Для інших способів зварювання доля витрат на вентиляцію не перевищує 3 %.

Найбільша вартість основного зварювального обладнання відзначається у випадку, коли для з'єднання залучають процес ЗТП, який характеризується значними технологічними перевагами порівняно з вищезгаданими способами зварювання плавленням. Основною особливістю ЗТП є можливість отримання високої якості з'єднань без розплавлення основного металу при пластичному деформуванні. Мала величина тепловкладення в процесі зварювання позитивно впливає на ступінь зниження міцності металу в зоні нагрівання і деформації зварних виробів. Серед недоліків такої технології є висока вартість зварного обладнання. Так, загальна вартість установок світових лідерів стартує з мітки 1,5 млн дол. США (рис. 7). В СНГ

таке обладнання не випускається. Мають місце окремі підприємства, які пропонують робочий інструмент для здійснення такого способу зварювання сталей малої міцності, а також сплавів на основі алюмінію, міді та нікелю.

Вартість обладнання для лазерного та гібридного зварювання коливається в межах від 500 тис. дол. до декілька млн дол. США.

Для наочності залежності технологічної собівартості від виду конструкцій на рис. 8 надані результати розрахунків сумарних витрат при виконанні процесу зварювання одного комплексу вафельних паливних баків.

Оптимізація витрат на амортизацію, поточний ремонт та обслуговування, які є найбільші за величиною, за рахунок зниження вартості зварювального обладнання можлива при реалізації операцій ЗТП на базі центрів металообробки, продольнофрезерних, поздовжньострогальних і інших металорі-

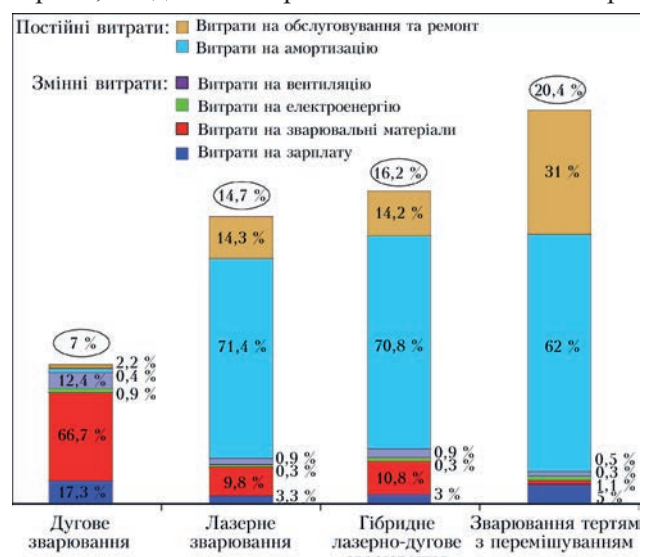


Рис. 8. Технологічна собівартість зварювання одного комплексу паливних баків вафельної конструкції

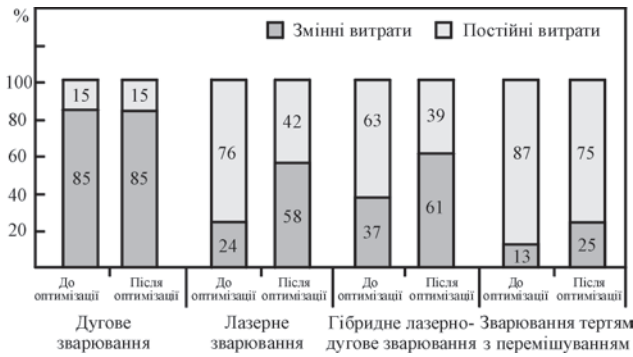


Рис. 9. Співвідношення між змінними та постійними витратами на виконання зварювання стрингерних паливних баків

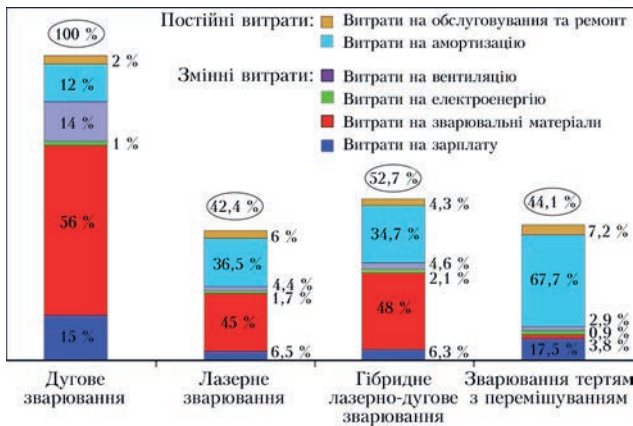


Рис. 10. Технологічна собівартість зварювання одного комплексу паливних баків стрингерної конструкції після оптимізації

зальних верстатах, що оснащено головками для ЗТП, а для лазерного та гібридного зварювання — використання вітчизняних установок з імпорфтними лазерами. Це дозволяє змінити співвідношення між змінними та постійними витратами (рис. 9).

На рис. 10 представлено структуру технологічної собівартості зварювання одного комплексу паливних баків стрингерної конструкції після оптимізації.

Розрахунок повних витрат на проведення зварювальних робіт, тобто з урахуванням витрат на проведення поточного ремонту, обслуговування та амортизацію обладнання, які представляють собою вартість даного обладнання, при виготовленні однієї конструкції баку підвищує суму витрат у разі, коли використовуються високотехнологічні

способи зварювання – лазерне, гібридне, а також тертям з перемішуванням. Слід відмітити, що це не додає принципових змін економічному ранжуванню способів зварювання, які розглядаються у даному дослідженні.

Співставлення витрат на зварювання паливних баків вафельної та стрингерної конструкції однозначно свідчить про економічну доцільність використання в першу чергу лазерного та гібридного способів зварювання (табл. 5 та рис. 11).

Рівень трудомісткості дугового способу з'єднання конструктивних елементів при виготовленні паливних баків в 3,0...3,5 разів перевищує трудомісткість при використанні лазерного або гібридного способу. Це робить дугову технологію неконкурентоздатною, не дивлячись на більш низьку вартість зварювального обладнання. Тим не менш, необхідно зазначити, що цей дуговий спосіб зварювання може розглядатися в якості ремонтної технології або як частковий варіант технології виготовлення одиничних зразків дослідних моделей виробів космічної техніки.

Таким чином, серед розглянутих способів зварювання з точки зору економічної доцільності слід віддати перевагу способу зварювання тертям, але після того, як будуть встановлені вихідні дані, тобто після завершення досліджень структури та фізико-механічних властивостей зварних з'єднань та розробки нормативної документації щодо виробничого технологічного процесу. Тим не менш, вже зараз можна очікувати значну економічну ефективність при застосуванні такої технології зварювання для виготовлення конструкцій паливних баків ракет-носіїв.

В теперішній час досліджуються технології з'єднання елементів конструкції паливного баку шляхом використання більш досконалих за структурою та властивостями алюмінієвих сплавів марок 2219, 2195 або 2198. Отримані результати щодо зварюваності та фізико-механічних властивостей зварних з'єднань дозволяють прогнозувати заміну традиційних сплавів в конструкції паливного баку на нові сплави. Значні габарити паливних баків зумовлюють доцільність виконання процесу зварювання у вертикальному положенні. При цьому можливе переміщення конструкції баку відносно платформи

Таблиця 5. Кваліметричне ранжування способів зварювання паливних баків за економічними показниками

Критерії	Дугове зварювання	Лазерне зварювання	Гібридне лазерно-дугове зварювання	Зварювання тертям з перемішуванням
Заробітна плата	4	1	2	3
Зварювальні матеріали	4	2	3	1
Електроенергія	2	3	4	1
Вентиляція	4	2	3	1
Амортизація	1	2	3	4
Поточний ремонт	2	3	1	4
Σ	17	13	16	14
Σ загальні витрати	4	1	3	2
ΣΣ	21	14	19	16

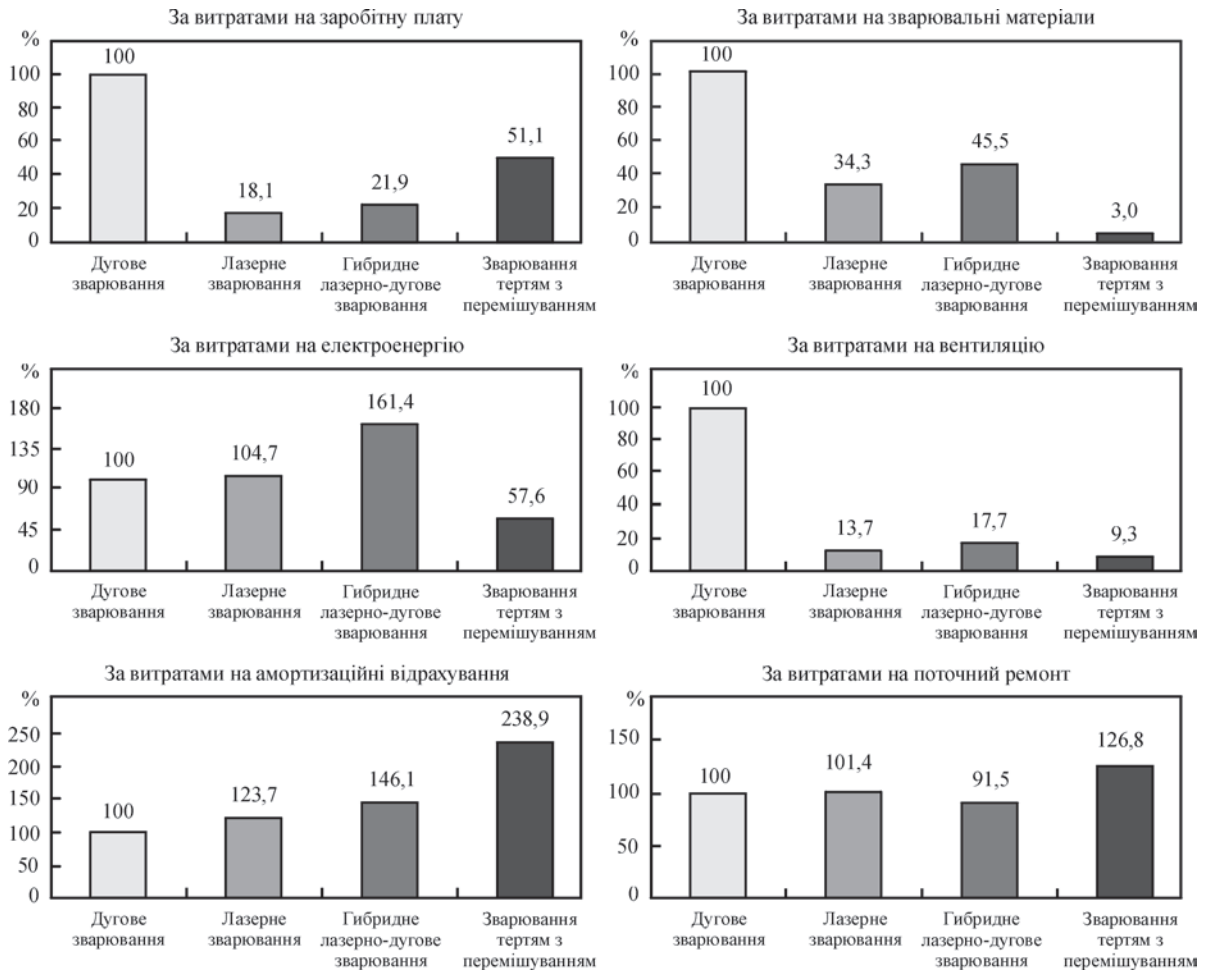


Рис. 11. Ранжування способів зварювання паливних баків стрингерної панелі після оптимізації

зі зварювальним устаткуванням. За кордоном завершується широкомасштабне дослідження експлуатаційних властивостей зварних з'єднань та розробка нової технологічної документації. Така стратегія виробництва сприяє розширенню сфери застосування як нових сплавів алюмінію, так і відпрацюванню способів їх зварювання. Мала величина погонної енергії зварювання при ЗТП створює необхідні для формування зварного шва теплофізичні умови. Отже, реалізуються умови, за яких деформується вже твердий розчин, який розпався, що позитивно проявляється на значеннях фізико-механічних властивостей зварних з'єднань, ступеня зниження міцності металу в зоні нагрівання, деформації зварних виробів. В результаті підвищуються показники надійності конструкції паливних баків та тактико-технічні характеристики ракет-носіїв.

Комплексний аналіз економічної ефективності технічних рішень проводили за таким алгоритмом розрахунків:

- маси конструкції ЦТ ТО1 (традиційне рішення);
- зміни маси конструкції ЦТ ТО1 (нове рішення);
- зміни маси ПГ (нове рішення);
- зміни вартості пуску (нове рішення);
- маси і вартості матеріалу ЦТ ТО1 (традиційне рішення);

– зміни маси і вартості матеріалу ЦТ ТО1 (нове рішення);

– зміни витрат на матеріали ЦТ ТО1 (нове рішення);

– способів зварювання та сумарної довжини швів ЦТ ТО1 (традиційне рішення);

– зміни способу зварювання та сумарної довжини швів ЦТ ТО1 (нове рішення);

– зміни витрат на виконання зварювальних робіт при виготовленні ЦТ ТО1 (нове рішення);

– вартості пуску (традиційне рішення);

– зміни економічної ефективності, яка пов'язана зі зміною вартості пуску (маси ПГ) та загальних витрат на виготовлення ЦТ ТО1 (витрати на матеріали та проведення зварювальних робіт) (нове рішення).

Технологічні витрати на дугове зварювання при виготовленні паливних баків (табл. 6) складають 5324 тис. дол. США, при лазерному та лазерно-дуговому відповідно 1529 тис. дол. США та 2013 тис. дол. США, а найнижчий показник 697 тис. дол. США при застосуванні зварювання тертям з перемішуванням.

Витрати на запуск наплавленого металу при застосуванні дугового зварювання 2600 тис. дол. США, при використанні лазерного та лазерно-дугового

Таблиця 6. Показники економічної ефективності способів зварювання

Технологія зварювання	Маса наплавленого металу, кг	Витрати на запуск 1 кг грузу, дол. США	Витрати на запуск наплавленого металу, тис. дол. США	Технологічні витрати на зварювання, тис. дол. США	Витрати, усього, тис. дол. США
Дугове	325	8000	2600	5324	7924
Лазерне	113	8000	904	1529	2433
Гібридне	150	8000	1200	2013	3213
ЗТП	35	8000	280	697	977

Таблиця 7. Попередні результати комплексного аналізу економічної ефективності технічних рішень

Конструкція	Маса конструкції ЦЧ ТО1, %	Витрати на матеріали, %	Витрати на зварювання, %	Інтегральний показник економічної ефективності, який приведений до вартості пуску, %
Вафельна, АМг6 (1201)	100	100	100	0
Стрингерна, АМг6 (1201)	98,4	29,9	699,5	0,3
Вафельна, 2195 (2198)	75,0	375,2	87,0	2,3
Стрингерна, 2195 (2198)	73,8	412,2	609,2	2,9

– відповідно 904 тис. дол. США та 1200 тис. дол. США, а найнижчий показник 280 тис. дол. США при застосуванні зварювання тертям з перемішуванням.

Результати комплексного аналізу економічної ефективності технічних рішень виготовлення паливних баків вафельної та стрингерної конструкції з різних матеріалів наведено в табл. 7.

Висновки

1. Значне підвищення економічної ефективності конструкції паливного баку першого ступеня ракети-носія можна очікувати за умов використання замість традиційного сплаву марки АМг6 на сучасні, наприклад, алюмінієво-літєві сплави, з більш високими фізико-механічними характеристиками, та шляхом розробки високопродуктивної технології їх зварювання.

2. Критерієм економічної оптимізації обрано ступінь зниження вартості пуску ракети внаслідок зменшення маси наплавленого металу при застосуванні розглянутих способів зварювання. З урахуванням цього критерію найбільш оптимальним можуть вважатися інноваційні способи зварювання у твердій фазі – тертям з перемішуванням або лазерне зварювання плавленням. Вибір способу зварювання визначається експлуатаційними вимогами до зварної конструкції.

3. Для забезпечення високого рівня тактико-технічних характеристик конструкції ракети-носія актуальним залишається розробка та промислове впровадження зазначених інноваційних технологій зварювання, які гарантовано дозволяють отримати високу якість швів нероз’ємних з’єднань, підвищення їх фізико-механічних характеристик, мінімізацію термомеханічного впливу процесу зварювання на структуру та властивості основного металу. Для реалізації встановлених задач сучасного технологічного переоснащення виробничої бази та широкого промислового використання ефективного устаткування поряд з більш досконалими зварювальними технологіями необхідно визначити та економічно обґрунтувати об’єми їх застосування та вартість.

Список літератури

1. Патон Б.Е. (2018) Сварка в ракетно-космической промышленности. *Космична наука і технологія*, 24, 5, 4–9.
2. Андрюшкин А.Ю., Галинская О.О., Сигаев А.Б. (2015) *Производство сварных конструкций в ракетно-космической технике: учебное пособие*. СПб., Балт. гос. техн. ун-т.
3. Ищенко А.Я., Лабури Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов: монография*. Киев, Наукова думка.
4. Фудзивара Т. (2001) Технологии соединения легких металлов в авиационной и космической технике. *Кэйкиндзюку ёсэцу*, 39, 3, 1–11.
5. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *J. of the Japan welding society*, 62, 8, 46–52.
6. Каблов Е.Н. (2000) Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века. *Перспективные материалы*, 3, 27–36.
7. Махин И.Д., Носачев С.Н., Усов П.А. (2014) Особенности применения технологии автоматической импульсной лазерной сварки. *Космическая техника и технологии*, 4, 7, 54–61.
8. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Е.Н. Иода (2017) Структура и свойства сварных соединений сплавов В-1579 и В-1481, выполненных лазерной сваркой. *Электронный научный журнал «ТРВДЫ ВИАМ»*, 7. Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1129
9. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Трушников А.В. и др. (2016) Лазерная сварка высокопрочных алюминий-литиевых сплавов с присадочной проволокой. *Сварочное производство*, 6, 44–50.
10. (2019) Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов при изготовлении РКТ. *РИТМ машиностроения*, 7, 36–39.

Referemces

1. Paton, B.E. (2018) Welding in rocket and space industry. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, 24(5), 4–9 [in Russian].
2. Andryushkin, A.Yu. Galinskaya, O.O., Sigaev, A.B. (2015) *Producing of welded structures in rocket and space engineering: Manual*. St. Petersburg, BGТУ [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys: Monography*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
4. Fudjiwara, T. (2001) Joining technologies of light metals in rocket and space engineering. *J. of Japan Institute of Light Metals*, 39(3), 1–11.
5. Kiyoto, S. (1993) Materials and joining technologies for rocket structures. *J. of the Japan Welding Society*, 62(8), 46–52.
6. Kablov, E.N. (2000) Main trends of development of materials for aerospace engineering of 21st Century. *Perspectivnyye Materialy*, 3, 27–36 [in Russian].
7. Makhin, I.D., Nosachev, S.N., Usov, P.A (2014) Peculiarities of application of technology of automatic pulsed laser welding. *Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologii*, 4(7), 54–61 [in Russian].

8. Skupov, A.A., Panteleev, M.D., Ioda, E.N. (2017) Structure and properties of joints of alloys V-1579 and V-1481 performed by laser welding. *Trudy VLAM*, 7 [in Russian]. http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1129
9. Shiganov, I.N., Kholopov, A.A., Trushnikov, A.V. et al. (2016) Laser welding with filler wire of high-strength aluminium-lithium alloys. *Svarochn. Proizvodstvo*, 6, 44–50 [in Russian].
10. (2019) Friction stir welding of aluminium alloys in manufacturing of RST. *RITM Mashinostroeniya*, 7, 36–39 [in Russian].

ECONOMIC OPTIMIZATION OF THE METHODS OF WELDING THE STRUCTURES OF FUEL TANKS FOR AEROSPACE ENGINEERING

L.M. Lobanov¹, O.P. Kushnar'ov², O.A. Mazur¹, T.M. Labur¹, I.L. Sniegirov², S.V. Pustovoit¹

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²SC M.K.Yangel DB «Pivdenne». 3 Kryvaryzhska Str., 349008, Dnipro, Ukraine. E-mail: info@yuzhnoye.com

Welding and other related technologies are used in manufacture of space vehicles. When developing the designs of third generation rockets, special attention is paid to problems of improvement of flight reliability and safety characteristics that is ensured by rational application of new types of high-performance welded joints in the design, which are produced due to introduction of effective welding processes. Fabrication of the traditional (waffle) structure and advanced (stringer) structure was analyzed, taking into account the cost-effectiveness of application of the welding processes. In terms of cost-effectiveness, it is rational to apply friction stir welding. Here, a considerable economic effect of application of friction stir welding technology for fabrication of structures of fuel tanks of rocket carriers is anticipated. 10 Ref., 7 Tabl., 11 Fig.

Keywords: aluminium alloys, arc welding, laser welding, hybrid laser-arc welding, friction stir welding, economic expenses, research

Надійшла до редакції 20.01.2022

ПЕРЕДПЛАТА 2022

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм.

А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель CMYK, роздільна здатність 300 dpi.



ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
 Тел./факс: 38044 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>