



# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ  
НАУК УКРАЇНИ

Том 28  
2(135)  
2022

## SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ ✦ ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. ✦ ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК ✦ КИЇВ

### ЗМІСТ

#### Космічні матеріали та технології

*Гайдачук О. В., Кондратьєв А. В., Набокiна Т. П.* Оптимізація тиску і часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного . . . . . 3

*Ниркова Л. І., Лабур Т. М., Шевцов Є. І., Назаренко О. П., Дорофєєв А. В., Осадчук С. О., Яворська М. Р., Покляцкий А. Г., Федорчук В. Є.* Комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 у умовах моделювання експлуатації . . . . . 14

#### Дослідження Землі з космосу

*Ємельянов М. О., Шелестов А. Ю., Яйлимова Г. О., Шумило Л. Л.* Вплив зміни клімату на площі основних сільськогосподарських культур . . . . . 30

#### Космічні апарати і корисне навантаження

*Ben Bahri O.* Impact of Didactic Satellite in Space Maturity Improvement: A Review Paper . . . . . 39

#### Моніторинг космічного простору і космічне сміття

*Bushuev F. I., Kaliuzhnyi M. P., Kriuchkovskiy V. F., Kulichenko M. O., Shulga O. V., Zhang Z., Bezrukovs V., Malynovskiy Ye. V., Reznichenko O. M., Bryukhovetsky O. B., Tuccari G.* Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory . . . . . 48

### CONTENTS

#### Space Materials and Technologies

*Haidachuk O. V., Kondratiev A. V., Nabokina T. P.* Optimization of pressure and time of composite products molding at the temperature of minimum binder viscosity . . . . . 3

*Nyrkova L. I., Labur T. M., Shevtsov E. I., Nazarenko O. P., Dorofeev A. V., Osadchuk S. O., Yavorska M. R., Poklyatsky A. G., Fedorchuk V. E.* Complex of properties of 2219 alloy weld joint in T62 state under modeling operating conditions . . . . . 14

#### Study of the Earth from Space

*Yemelyanov M. O., Shelestov A. Yu., Yailymova H. O., Shumilo L. L.* Impact of climate change on the area of major crops . . . . . 30

#### Spacecrafts and Payloads

*Ben Bahri O.* Impact of Didactic Satellite in Space Maturity Improvement: A Review Paper . . . . . 39

#### Space Environment Monitoring and Space Debris

*Bushuev F. I., Kaliuzhnyi M. P., Kriuchkovskiy V. F., Kulichenko M. O., Shulga O. V., Zhang Z., Bezrukovs V., Malynovskiy Ye. V., Reznichenko O. M., Bryukhovetsky O. B., Tuccari G.* Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory . . . . . 48

<i>Вовчик Є. Б., Білінський А. І., Мартинюк-Лотоцький К. П., Вірун Н. В., Підстригач І. Я., Ногач Р. Т.</i> Оптичні спостереження штучних космічних об'єктів у Львівській астрономічній обсерваторії . . . . .	54	<i>Vovchik Ye. B., Bilinsky A. I., Martynyuk-Lototsky K. P., Virun N. V., Pidsryhach I. Ya., Nohach R. T.</i> Optical observations of the artificial objects at the Lviv Astronomical Observatory . . . . .	54
<b>Історія космічних досліджень</b>		<b>History of Space Research</b>	
<i>Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Коробченко А. А., Пилипчук О. О.</i> Альфред Рассел Уоллес про гармонію у Всесвіті (До 120-річчя його праці «Місце людини у Всесвіті») . . . . .	61	<i>Pylypchuk O. Ya., Strelko O. H., Korobchenko A. A., Pylypchuk O. O.</i> Alfred Russel Wallace about harmony in the Universe (To the 120th anniversary of his work «Man's Place in the Universe») . . . . .	61

*На першій сторінці обкладинки* — Телескоп АЗТ-14 із сучасною прийнятною системою (див. статтю Вовчик Є. Б. та ін. Оптичні спостереження штучних космічних об'єктів у Львівській Астрономічній обсерваторії, С. 54—60)

**Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук**

**Відповідальний секретар редакції** О.В. КЛИМЕНКО

**Адреса редакції:** 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54  
 тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: [reda@mao.kiev.ua](mailto:reda@mao.kiev.ua)  
 Веб-сайт: [space-scitechnjournal.org.ua](http://space-scitechnjournal.org.ua)

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.  
 Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р.,  
 Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

---

Підписано до друку 23.05.2022. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.  
 Ум. друк. арк. 7,14. Обл.-вид. арк. 7,50. Тираж 50 прим. Зам. № 6613.

---

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України  
 вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.003>  
УДК 678.5.067

**О. В. ГАЙДАЧУК<sup>1</sup>**, проф., професор-консультант, д-р техн. наук  
E-mail: a.gaydachuk@khai.edu

**А. В. КОНДРАТЬЄВ<sup>2</sup>**, проф., проф., д-р техн. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>  
E-mail: kondratyev\_a\_v@ukr.net; andrii.kondratiev@kname.edu.ua

**Т. П. НАБОКІНА<sup>3</sup>**, доцент, доцент, канд. техн. наук  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0019-5066>  
E-mail: t.nabokina@khai.edu

<sup>1</sup> Технологічний університет Нінбо

201 вул. Фенхуа, Цзянбей Цюй, Нінбо Ші, Чжецзян Шен, КНР

<sup>2</sup> Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова  
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, Україна, 61002

<sup>3</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»  
вул. Чкалова 17, Харків, Україна, 61070

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТИСКУ І ЧАСУ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ВИРОБІВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ МІНІМАЛЬНОЇ В'ЯЗКОСТІ СПОЛУЧНОГО

*Технологічний процес формування композитних виробів полягає в наданні їм на форматворному оснащенні необоротної форми шляхом полімеризації сполучного при певних температурі та тиску, що змінюються в часі. Статтю присвячено дослідженню технологічних параметрів найпоширенішого на практиці способу формування виробів із полімерних композиційних матеріалів, попередньо сформованих із препрегів. Отримала подальшого розвитку математична модель заповнення сполучним міжволоконного простору армувального матеріалу для полімерного композиційного матеріалу із різною щільністю впакування волокон від квадратичної до гексагональної, зумовленої видом армувального матеріалу. Розроблено нову методику оптимізації тиску та часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного. Методику реалізовано аналітичними залежностями, що встановлюють оптимальні часові інтервали і тиск формування на ділянці температурно-часової діаграми, яка пов'язана зі здатністю застосовуваного устаткування (печі, автоклава) забезпечити максимально можливо швидкість підйому температури з метою «розм'якшення» сполучного у препрезі до мінімальної його в'язкості. Показано, що витрати енергії на переформування тетрагональної структури полімерного композиційного матеріалу у гексагональну в десятки раз перевищують витрати для формування тетрагональної структури. Так, переформування тетрагональної структури при об'ємному вмісті сполучного 0.4 у щільну гексагональну структуру вимагає збільшення тиску в 66.7 раз. Отримані результати дозволяють встановити економічно доцільний рівень тиску та часу формування композитних виробів при забезпеченні їхньої регламентованої якості.*

**Ключові слова:** препрег, полімеризація сполучного, міжволоконний простір, квадратична та гексагональна структура.

Цитування: Гайдачук О. В., Кондратьєв А. В., Набокiна Т. П. Оптимізація тиску і часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 3—13.  
<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.003>

## 1. ВСТУП

Удосконалювання та розроблення нових конструкцій авіаційної та ракетно-космічної техніки пов'язане із більш широким використанням полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) [3, 12]. Такі матеріали мають властивості та особливості, що відрізняються від характеристик традиційних конструкційних матеріалів [10, 14]. Унікальна сукупність характеристик ПКМ відкриває широкі можливості як для вдосконалювання відомих, так і для розроблення нових конструкцій і технологічних процесів [22, 28].

Як відомо [4, 11], технологічний процес формування виробу із ПКМ полягає в наданні йому на формотворному оснащенні необоротної форми шляхом полімеризації сполучного при певних температурі  $t$  і тиску  $p$ , що змінюються в часі  $\tau$ . Параметри  $t$ ,  $p$  і  $\tau$  або  $t(\tau)$  і  $p(\tau)$  є основними зовнішніми технологічними параметрами процесу формування виробу із ПКМ. Внутрішніми параметрами процесу є динамічна в'язкість сполучного  $\mu(t, \tau)$ , а також об'ємний вміст  $\theta_b$  і його структурні характеристики.

Через те що внутрішні параметри визначаються обраними сполучним і армувальним матеріалом, виходячи з експлуатаційних характеристик виробу, то завданням процесу формування є встановлення такого оптимального співвідношення між ними та змінними зовнішніми параметрами, при якому забезпечується регламентована технічним завданням якість виробу при мінімальних енергетичних витратах. У зв'язку із цим виникає необхідність оптимізації параметрів процесу формування.

## 2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В авіа- та супутникобудуванні переважають конструкції із ПКМ, що виготовляються методами викладення [3, 23]. Серед них найбільш висока якість виробів при прийнятних енерго- та працезатратах забезпечується застосуванням препрегів [9]. Однак і формоутворення виробів із ПКМ методами намотування, характерне для конструкцій ракетної техніки [3], практично не виключає формування, що описується співвідношенням тих же зовнішніх параметрів  $t(\tau)$  і  $p(\tau)$  [21].

Температурно-часовий режим формування залежить від багатьох факторів, основними з яких є [11, 23]:

- тип і склад сполучного;
- спосіб просочення армувального матеріалу: попереднє готування препрегів з наступним формуванням виробу («сухий» спосіб формування), «мокрый» спосіб, що полягає в просоченні армувального матеріалу у процесі формування та наступного формоутворення виробу;
- тип армувального матеріалу та спосіб його попередньої підготовки;
- спосіб формування.

Дослідженням цих факторів займалася досить велика кількість авторів [5]. У більшості випадків отримані результати є або узагальненими схемами розв'язання, або моделями, які враховують лише окремі фактори процесу формування. Так, наприклад, у процесі роботи із препрегами вирішуються питання оптимальних технологічних режимів, що забезпечують їхню регламентовану якість [13]. При цьому режими технологічних процесів неоднозначно гармонізовано один з одним.

У роботі [15] досліджено закономірності нерівномірного просочення полімерного матеріалу. Показано, що ці явища зумовлені нерівномірністю градієнта температури. На основі цього розроблено технологічні заходи, які дозволили знизити нерівномірність масопереносу сполучного, забезпечивши необхідний ступінь просочення розглянутого полімерного матеріалу. На жаль, отримані результати слушні тільки для полімерного паперу, та не можуть бути узагальнені на інші полімерні матеріали.

У роботах [27, 32] описуються хімічні та фізичні процеси, що протікають у ПКМ у процесі затвердіння. Розглядаються проблеми, які виникають у процесі формування, моделюються хімічні перетворення у сполучному. У роботах [26, 31, 33] процес формування моделюється тільки одним компонентом — сполучним. При цьому розміри конструкції, умови прогріву та наявність армувального матеріалу не враховуються. В експериментальних дослідженнях [17, 30] показано, що на етапі розігрівання ПКМ, нарівні з усадкою у виникненні напруженого стану бе-

руть участь і температурні явища. Температурні напруження стають сумірними з усадковими по досягненню в'язкості матеріалу, яка відповідає 60...70 % конверсії в сполучному. Однак у цих роботах розглядається тільки етап розігріву та не враховується зміна властивостей матеріалів від температури.

Роботи [6, 24] досить точно моделюють неізо-термічний процес формування ПКМ на етапах нагрівання та охолодження. Досить докладно описується етап охолодження, обґрунтовуються можливі дефекти, які можуть виникнути на даному етапі за рахунок нерівномірного розподілу температурного поля по товщині виробу. Однак такі процеси, як видалення летких продуктів з формованого виробу, підведення тепла, а також виникнення напружено-деформівного стану за рахунок армувального матеріалу не розглядаються.

Практично всі роботи, за винятком [32], не приділяють належної уваги визначенню тиску формування, тоді як цей параметр є одним з основних [4, 11]. Тиск формування регламентує об'ємний вміст армувального матеріалу та забезпечує однорідність, дегазацію, а також і можливе зниження залишкового напруженого стану [23, 32].

У роботі [7] розроблено математичну модель укладання препрегу змінної ширини для заданих режимів його формування. У роботі [29] експериментально досліджено технологічні режими формування ПКМ. Проведені дослідження дозволили збільшити міцність ПКМ на 25...35 %. Однак отримані результати можуть бути застосовані лише для вузького класу матеріалів фторопласта і кварцової тканини.

У роботі [19] наведено аналіз проблемних питань формування для типового технологічного циклу виробництва композицій епоксидних полімерів. Обґрунтовано доцільність застосування ультразвукової модифікації для досягнення енергозбереження та підвищення якості одержуваних композитних виробів. У роботі [20] розроблено підхід до застосування принципів автоматизованого проектування для вибору оптимальних конструкторсько-технологічних параметрів при формуванні ПКМ із застосуванням ультразвукової обробки.

Особливий інтерес представляють моделі формування, запропоновані в роботах [8, 16]. Автори цих робіт пропонують не тільки вирішувати завдання вибору раціональних технологічних параметрів режиму формування, але й проводити контроль заданих параметрів, а якщо буде потреба — робити коректування у процесі формування. Запропонована в роботі [1] модель одержала подальший розвиток у роботі [2] для задачі про дві поверхні, що зближаються, видавлюючи рідину з в'язкістю. Однак у цій роботі як зовнішнє зусилля використано не розподілене по довжині пластини, а зосереджене в точці початку координат. Таке допущення призвело до його заниження в 1.33 раза. В роботах [1] ця математична модель заповнення сполучним отримала подальший розвиток. Було отримано аналітичну залежність тиску автоклавного формування від в'язкості, геометричних параметрів виробу, що формується, препрегу, моношару ПКМ і часу формування. Показано, що напрямлений вздовж горизонтальних каналів тиск в армувальному матеріалі завжди вище автоклавного. Це сприяє більш повному видаленню повітряних бульбашок і заповненню пустот сполучним, що забезпечує вищу якість формування композитного виробу. Але отримані результати не дозволили оптимізувати основні стадії температурно-часової діаграми циклу формування композитного виробу.

Із наведеного огляду видно, що у більшості робіт явище виникнення та впливу температурних напружень на етапі розігріву матеріалу і наявності армувального матеріалу у виробі не враховується, а технологічні параметри визначалися винятково фізико-механічними характеристиками сполучного. Такий підхід до визначення технологічних параметрів найчастіше призводить до порушення структури, появи неприпустимого напружено-деформівного стану у матеріалі-виробі та до додаткових витрат при виробництві конструкцій із ПКМ.

Метою роботи є розроблення методики оптимізації тиску і часу формування виробів із ПКМ при температурі мінімальної в'язкості сполучного, яка забезпечить мінімізацію енергетичних витрат на їхнє виготовлення.

### 3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Як вказувалося вище, температурно-часовий режим формування залежить від багатьох факторів [11, 21]. Кожен із цих факторів, від якого залежить температурно-часовий режим формування ПКМ, є комплексним. Він включає в себе ряд їхніх складових, комбінація яких і формує собою комплексний фактор, що призводить до вирождення тієї або іншої ділянки температурно-часової діаграми. Діаграма температурно-часового режиму формування виробу з ПКМ в загальному випадку має вигляд, показаний на рис. 1.

Так, наприклад, застосування сполучного холодного затвердіння при ручному пошаровому просоченні армувального матеріалу у процесі

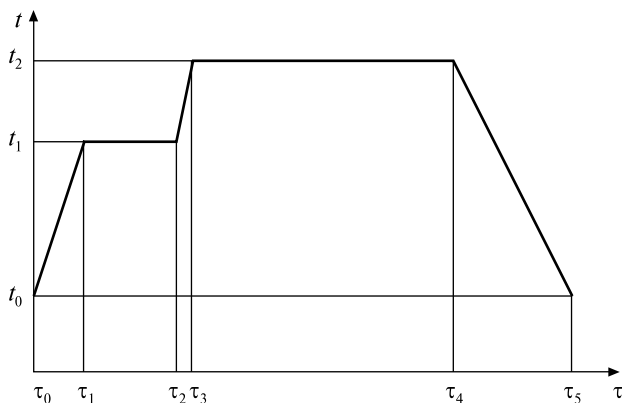


Рис. 1. Типова діаграма температурно-часового режиму формування виробів із полімерних композиційних матеріалів

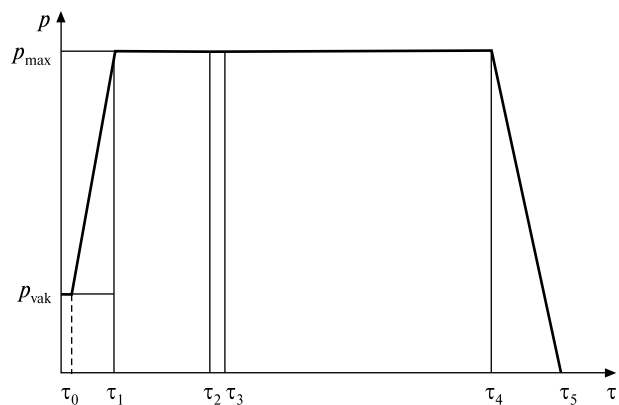


Рис. 2. Типова діаграма подачі тиску в процесі формування виробів із полімерних композиційних матеріалів

формування та наступного вільного формування без надлишкового тиску перетворює діаграму рис. 1 у пряму лінію  $t_0 = \text{const}$  при  $\tau = \tau_5$ . При препреговій технології та досить малій кількості газовиділень компонентів сполучного в процесі полімеризації вироджується ділянка  $\tau_1 - \tau_2$  і т. д. [11].

Температурно-часовий режим супроводжується певним режимом надлишкового тиску  $p$  (рис. 2).

При цьому режим подачі надлишкового тиску теж залежить від зазначених вище комплексних факторів. Наприклад, при застосуванні сполучного холодного затвердіння при ручному пошаровому просоченні армувального матеріалу у процесі формування та наступного вільного формування діаграма рис. 2 вироджується в лінію  $p = 0$ ,  $\tau = \tau_5$  або  $p = p_{vak}$ ,  $\tau = \tau_5$ . При пресуванні пакета  $p = p_{max}$ ,  $\tau = \tau_4$  і т. д. [11]

Водночас становить інтерес загальний випадок, коли суттєвими є всі зазначені вище комплексні фактори. Дослідимо загальний випадок, який характеризується наявністю діаграм рис. 1 і 2 при найпоширенішому на практиці способі формування виробу із ПКМ, попередньо сформованого із препрегу [5, 9]. У цьому випадку в «сухому» препрезі при якісному його виготовленні вміст розчинника становить 0...3 % [11, 25], який можна не враховувати. Наявність ділянки  $\tau_1 - t_1$  пов'язана зі здатністю застосовуваного устаткування (печі, автоклава) забезпечити максимально можливу швидкість підйому температури з метою «розм'якшення» сполучного у препрезі пакета ПКМ до мінімальної його в'язкості  $\mu_{min}$ , необхідної для його рівномірного розтікання в об'ємі пакету, що формується [18].

Раніше в роботі [1] було отримано залежність тиску формування виробів із ПКМ  $p$  від мінімальної в'язкості сполучного  $\mu_{min}(t, \tau)$  при постійній температурі  $t_1$ , що відповідає «сходінці» на температурно-часовій діаграмі циклу формування (рис. 1):

$$p_{max} = \frac{8\mu L^2}{\tau \left(1 - \sqrt{\frac{\pi}{1 - \theta_c}}\right)^2 h_{CM}^2}, \quad (1)$$

де  $\mu$  — в'язкість сполучного,  $L$  — найбільший позовжній розмір виробу, що формується,  $h_{CM}$  —

товщина формованого виробу,  $\tau$  — час, протягом якого сполучне заповнить усі порожнечі у пакеті композиту,  $\theta_b$  — об'ємний вміст сполучного.

Залежність (1) дозволяє визначити тиск формування при заданому часі  $\tau = \tau_2 - \tau_1$  або цей час при заданому тиску  $p$ .

Однак при отриманні залежності (1) передбачалося, що об'ємний вміст сполучного в ПКМ не перевищує відповідного квадратичній упаковці армувального матеріалу у структурі моношару ПКМ (рис. 3).

Така структура при максимальній щільності армувального матеріалу, яка відповідає  $l = d_f$  забезпечує об'ємний вміст сполучного, що дорівнює

$$\theta_{bq}^{\max} = \frac{d_f^2 - \frac{\pi d_f^2}{4}}{d_f^2} = 1 - \frac{\pi}{4} = 0.215.$$

Водночас теоретично максимальний об'ємний вміст сполучного при щільному гексагональному упакуванні волокон (рис. 4) дорівнює  $\theta_{bq}^{\max} = 0.09$  [4]. При армувальному матеріалі на основі тканини максимальний об'ємний вміст сполучного дорівнює  $\theta_b^{\max} = 0.32$  [4, 11].

Можна припустити, що в процесі формування протягом часу  $\tau_2 - \tau_1$  структура ПКМ отримує квадратичне впакування волокон.

Для переходу від цієї структури до гексагональної необхідний додатковий тиск, що забезпечує перетікання сполучного по криволінійній траєкторії  $l^*$  при зближенні сусідніх волокон (рис. 5, а).

У перехідній стадії замість відстані  $l$ , яку протікало сполучне у період формування квадратичної структури, воно має подолати відстань  $l^*$ , що дорівнює довжині дуги  $\cup EABC$  (рис. 5, б). Приймаючи ділянки  $EA$  і  $BC$  прямолінійними, довжину дуги  $\cup EABC = l^*$  можна визначити як

$$l^* = 2AE + \cup AB = \sqrt{l^2 - d_f^2} + 2\pi d_f \sin \frac{l}{4d_f}. \quad (2)$$

З урахуванням того, що  $\theta_b = \frac{\pi}{4} \frac{1 - d_f}{2l}$ , одержимо

$$l = \frac{\pi d_f}{4(1 - \theta_{bq})}. \quad (3)$$

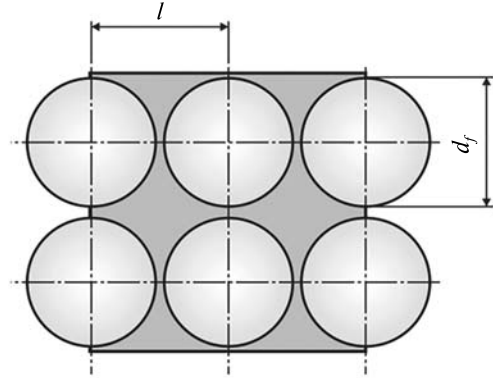


Рис. 3. Квадратична упаковка волокон у структурі полімерних композиційних матеріалів

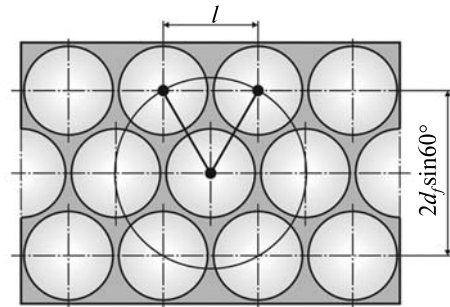


Рис. 4. Гексагональна упаковка волокон у структурі полімерних композиційних матеріалів

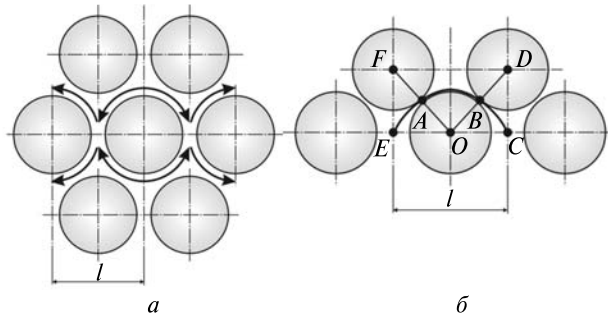


Рис. 5. Лінії течії сполучного у міжволоконних каналах при переході від квадратичної до гексагональної упаковки волокон армувального матеріалу: а — проміжна стадія, б — кінцева стадія

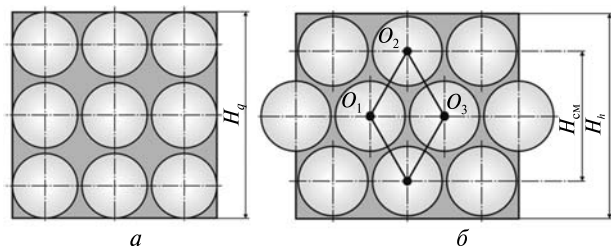


Рис. 6. Структура пакета у процесі формування полімерних композиційних матеріалів: *a* — при завершенні стадії квадратичного впакування волокон, *b* — при завершенні стадії гексагонального впакування волокон

З урахуванням (2) відношення матиме вигляд

$$\frac{l}{l^*} = \psi = \frac{4(1-\theta_{bq})}{\pi} \times \left[ \sqrt{\frac{\pi^2}{16(1-\theta_{bq})^2} - 1} + 2\pi \arcsin \frac{\pi}{16(1-\theta_{bq})} \right]. \quad (4)$$

На цей же коефіцієнт у повинна бути збільшена довжина виробу із ПКМ, що формується, у формулі (1):

$$L^* = L\psi. \quad (5)$$

До моменту, коли буде повністю сформоване квадратичне впакування волокон, товщина пакета із трьох моношарів (рис. 6, *a*) буде дорівнювати  $H_q = 3d_f$ . Товщина трьох моношарів при сформованому гексагональному впакуванні волокон  $H_h$  буде дорівнювати (рис. 6, *b*):

$$H_h = d_f + H_{CM}^*, \quad (6)$$

де

$$H_{CM}^* = 2d_f \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}}. \quad (7)$$

Таким чином, товщина шару сполучного  $h^*$ , що видавлюється на другій стадії формування, яка відповідає кінцевому об'ємному вмісту в ПКМ  $\theta_b^*$ , буде дорівнювати

$$h^* = \frac{H_q - H_h}{2} = d_f \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}} \right]. \quad (8)$$

При цьому  $\theta_b^*$  визначається формулою

$$\theta_b^* = 1 - \frac{V_f}{V_b} = 1 - \frac{\pi d_f^2}{2h^*l} = 1 - \frac{1 - \theta_{bq}}{\sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}}}. \quad (9)$$

Якщо стадію «сходінки» на рис. 1 представити двома часовими інтервалами  $(\tau'_2 - \tau_1)$  та  $(\tau_2 - \tau'_2)$ , де  $\tau'_2$  відповідає часу формування щільної квадратичної структури, то замість залежності (1) одержимо тиск для кожного із двох етапів:

$$P_{(\tau'_2 - \tau_1)} = \frac{8\mu L^2}{(\tau'_2 - \tau_1) d_f^2 \left( \sqrt{\frac{\pi}{1-\theta_c}} - 1 \right)^2}, \quad (10)$$

$$P_{(\tau_2 - \tau'_2)} = \frac{8\mu L^2 \psi^2}{(\tau_2 - \tau'_2) d_f^2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_{bq})^2}} - 1 \right)^2}. \quad (11)$$

Сумарна робота  $W_\Sigma$ , яка витрачається на формування в автоклаві кінцевої гексагональної структури ПКМ, дорівнює

$$W_\Sigma = P_{(\tau'_2 - \tau_1)} U + (P_{(\tau_2 - \tau'_2)} - P_{(\tau'_2 - \tau_1)}) U = P_{(\tau_2 - \tau'_2)} U, \quad (12)$$

де  $U$  — об'єм автоклава з урахуванням завантаження його виробом в оснащенні, що формується.

З виразу (11) випливає, що мінімальне значення тиску  $P_{(\tau_2 - \tau'_2)}$ , яке забезпечує перехід від тетрагональної до гексагональної структури ПКМ, має місце при максимальному значенні часового інтервалу  $(\tau_2 - \tau'_2)$ , тобто

$$P_{(\tau_2 - \tau'_2)} \rightarrow \min \text{ при } (\tau_2 - \tau'_2) \rightarrow \max. \quad (13)$$

Реалізація (13) у свою чергу вимагає виконання умови

$$(\tau_2 - \tau'_2) \rightarrow \max \text{ при } (\tau'_2 - \tau_1) \rightarrow 0. \quad (14)$$

Умова (14) виконується, якщо  $\tau'_2 \rightarrow \tau_1$ .

Таким чином, мінімальний тиск в автоклаві, що забезпечує перехід від тетрагональної до гексагональної структури ПКМ, реалізується його постійністю у всьому часовому інтервалі  $\tau_2 - \tau_1$ .

У цьому випадку з умови рівності тисків  $P_{(\tau'_2 - \tau_1)}$  з (10) і  $P_{(\tau_2 - \tau'_2)}$  з (11) знаходимо умовне



значення  $\tau'_2$ , що відповідає початку переходу тетрагональної структури в гексагональну. Термін «умовне» підкреслює, що  $\tau'_2$  не пов'язане зі зміною тиску в цей момент часу, а відповідає тільки початку переходу структури ПКМ від однієї форми до іншої.

Після відповідних перетворень значення  $\tau'_2$  визначиться залежністю

$$\tau'_2 = \frac{\tau_2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \tau_1 \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2}{\left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2} \quad (15)$$

Підставивши значення  $\tau'_2$  в (10) або (11), що рівнозначно, тому що  $\tau'_2$  отримане з умови їхньої рівності, яке забезпечує мінімум енерговитрат на формування, отримаємо після перетворень

$$p_{opt} = \frac{8\mu L^2 \left[ \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 + \psi^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2 \right]}{d_f^2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\pi}{(1-\theta_b)}} \right)^2 \left( \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{64(1-\theta_b)^2}} - 1 \right)^2 (\tau_2 - \tau_1)} \quad (16)$$

В окремому випадку, коли щільність волокон в армувальному матеріалі дозволяє сформувавши щільну тетрагональну структуру ПКМ, а потім його гексагональну структуру, залежності (15) і (16) можуть бути суттєво спрощені, тому що при цьому  $\theta_b = \theta_b^{\max} = 0.215$ , а  $\psi = 1.57$ .

Витрати енергії на переформування тетрагональної структури ПКМ у гексагональну в десятки раз перевищують витрати для формування тетрагональної структури. Так при  $\tau_1 = 30$  хв і  $\tau_2 = 50$  хв тиск для формування тетрагональної структури при  $q_b = 0.4$  дорівнює

$$p_t = 0.24 \frac{\mu L^2}{d_f^2}.$$

Натомість переформування цієї структури у щільну гексагональну структуру вимагає тиску

$$p_{opt} = 16 \frac{\mu L^2}{d_f^2},$$

тобто в 66.7 раз більше, ніж для  $p_t$ .

## ВИСНОВКИ

На основі запропонованих раніше підходу та математичної моделі заповнення сполучним міжволоконного простору армувального матеріалу для ПКМ із різною щільністю впакування волокон від квадратичної до гексагональної, зумовленої видом армувального матеріалу, розроблено нову методику оптимізації тиску та часу формування виробів із ПКМ при температурі мінімальної в'язкості сполучного. Методику реалізовано аналітичними залежностями, що встановлюють оптимальні часові інтервали і тиск формування на ділянці температурно-часової діаграми, які відповідають постійній температурі («сходінці»). Методика дозволяє встановити економічно доцільний рівень тиску при забезпеченні регламентованої якості композитного виробу, що формується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гайдачук А. В. Методика исследования технологических параметров процесса формования изделий из полимерных композиционных материалов на основе препрегов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 2002. Вып. 30(3). С. 17–22.
2. Гайдачук В. Е., Сидоренкова М. А. Выбор оптимального давления при формовании конструкций из полимерных композиционных материалов. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 1997. С. 8–12.
3. Дегтярев А. В., Коваленко В. А., Потапов А. В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 2(89). С. 34–38.
4. Михайлин Ю. А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. — СПб.: НОТ, 2008. 822 с.
5. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Remko Akkerman, Jesper H. Hattel A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes. *Archives of computational methods in engineering*. 2017. No. 24. P. 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>
6. Baranov A. V. Non-isothermal curing and chemical effects during cavity filling with impregnated anisotropic layer. *Механіка композиційних матеріалів і конструкції*. 2004. **10**, No. 1. P. 15–22.
7. Bitjukov Yu. I., Kalinin V. A. The numerical analysis of the scheme on packing of the tape of variable width on the technological surface in the course of winding of designs from composite materials. *Механіка композиційних матеріалів і конструкції*. 2010. **16**, No. 2. P. 276–290.
8. Blagonadezhin V. L., Vorontsov A. N., Murzakhanov G. K. Technological problems of mechanics of structures made of composite materials. *Mechanics of composite materials*. 1988. **23**. P. 608–625. <https://doi.org/10.1007/BF00605687>
9. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: a review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer composites*. 2020. **41**, No. 9. P. 3440–3458. <https://doi.org/10.1002.pc.25642>
10. Bychkov A. S., Kondratiev A. V. Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. *J. superhard materials*. 2019. **41**, No. 1. P. 53–59. <http://doi.org/10.3103/S1063457619010088>
11. Campbell F. C. *Manufacturing processes for advanced composites*. — Elsevier science. 2004. 532 p.
12. Castanie B., Bouvet C., Malo Ginot. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites part C*. 2020. **1**. 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
13. Deng B., Shi Y., Yu T., Zhao P. Influence mechanism and optimization analysis of technological parameters for the composite prepreg tape winding process. *Polymers*. 2020. **12**, No. 8. P. 1843. <https://doi.org/10.3390/polym12081843>
14. Fomin O., Logvinenko O., Burlutsky O., Rybin A. Scientific substantiation of thermal leveling for deformations in the car structure. *Int. J. engineering & technology*. 2018. **7**, No. 4.3. P. 125–129. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19721>
15. Gaydachuk A. V., Slivinskiy M. B., Golovanevskiy V. A. Static electricity build-up considerations in manufacture of cores for sandwiched composite materials structures. *Materials forum*. 2006. **30**. P. 103–109.
16. Jaeger J. C. *Elasticity, Fracture and Flow*. Springer, 1969. 268 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6024-7>
17. Jinno M., Sakai S., Osaka K., Fukuda T. Smart autoclave processing of thermoset resin matrix composites based on temperature and internal strain monitoring. *Adv. composite material*. 2003. **12**, No. 1. P. 57–72. <https://doi.org/10.1163/156855103322320374>
18. Karandashov O., Avramenko V. Studies of thermal stability of epoxy compound for glass-fiber pipes. *Chemistry & chemical technology*. 2017. **11**, No. 1. P. 61–64. <https://doi.org/10.23939/chcht11.01.061>
19. Kolosov A. E., Sakharov A. S., Sivetskii V. I., Sidorov D. E., Sokolskii A. L. Substantiation of the efficiency of using ultrasonic modification as a basis of a production cycle for preparing reinforced objects of epoxy polymer composition. *Chemical and petroleum engineering*. 2012. **48**. P. 391–397. <https://doi.org/10.1007/s10556-012-9629-9>
20. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and petroleum engineering*. 2015. **51**. P. 493–500. <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0075-3>
21. Kondratiev A. V. A concept of optimization of structural and technological parameters of polymer composite rocket units considering the character of their production. *Space Science and Technology*. 2020. **26**, No. 6 (127). P. 5–22. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005>
22. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E. Mathematical analysis of technological parameters for producing superfine prepregs by flattening carbon fibers. *Mechanics of Composite Materials*. 2021. **57**, № 1. P. 91–100. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09936-3>
23. Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*. 2019. **25**, No. 4 (119). P. 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>

24. Korotkov V. N., Chekanov Y.A., Rozenberg B. A. Nonisothermal curing of articles formed from polymeric composite materials in the winding process. *Mechanics of composite materials*. 1989. **25**. P. 73–78. <https://doi.org/10.1007/BF00608454>
25. Mustafa L. M., Ismailov M.B., Sanin A.F. Study on the effect of plasticizers and thermoplastics on the strength and toughness of epoxy resins. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2020. **4**. P. 63–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/063>
26. Nemirovskii Y. V., Yankovskii A. P. Effect of the thermal action and thermosensitivity of phase materials on the load-carrying capacity of momentless shells with an equal-stressed reinforcement. *Mechanics of composite materials*. 2002. **38**. P. 525–538. <https://doi.org/10.1023/A:1021778626055>
27. Nikolaev V. P., Pichugin V. S., Korobeinikov A. G. Effect of molding conditions on fracture mechanisms and stiffness of a composite of grid structure. *Mechanics of composite materials*. 1999. **35**. P. 49–54. <https://doi.org/10.1007/BF02260811>
28. Rodichev Y. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load. *Strength of materials*. 2018. **50**, No. 6. P. 868–873. <http://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4>
29. Rodionov V. V. Optimization of molding the polymeric composite material with improved characteristics. *Plasticheskie massy*. 2019. **3-4**. P. 55–58. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-55-58>
30. Russell John D., Madhu S. Madhukar Mohamed S., Genidy Andre Y. Lee. A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part III: Correlating stress history to viscosity, degree of cure and cure shrinkage. *J. composite materials*. 2000. **34**, No. 22. P. 1925–1947.
31. Teters G., Kregers A. Optimization of a composite plate buckling under thermal action with account of reliability. *Mechanics of composite materials*. 2000. **36**. P. 453–458. <https://doi.org/10.1023/A:1006750431407>
32. Tomashevskii V. T. Yakovlev V. S. Models in the engineering mechanics of polymer-matrix composite systems. *Int. applied mechanics*. 2004. **40**, No. 6. P. 601–621. <https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000041391.28104.b7>
33. Verbitskaya N. A. Influence of complex compounds of rhenium (V), molybdenum (V) with macrocyclic ligands on processes of structure formation in epoxyurethane binder. *Plasticheskie massy: sintez svojstva pererabotka primenenie*. 2001. **7**. P. 10–14.

#### REFERENCES

1. Hajdachuk A. V. (2002). Technique for studying the technological parameters of the molding process of products from polymer composite materials based on prepregs. *Design and production of aircraft structures*, **30**(3), 17–22. [In Russian].
2. Gaidachuk V. E., Sidorenkova M. A. (1997). Selection of the optimal pressure when molding structures from polymer composite materials. *Design and production of aircraft structures*, 8–12.
3. Degtjarev A. V., Kovalenko V. A., Potapov A. V. (2012). The use of composite materials to create promising rocket technology. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 2(89), 34–38.
4. Mihajlin Ju. A. (2008). *Structural polymer composite materials*. SPb.: NOT Publ. 822.
5. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Remko Akkerman, Jesper H. (2017). Hattel A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes. *Archives of computational methods in engineering*, No. 24, 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>
6. Baranov A. V. (2004). Non-isothermal curing and chemical effects during cavity filling with impregnated anisotropic layer. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, **10**, No. 1, 15–22.
7. Bitjukov Yu. I., Kalinin V. A. (2010). The numerical analysis of the scheme on packing of the tape of variable width on the technological surface in the course of winding of designs from composite materials. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, **16**, No. 2, 276–290.
8. Blagonadezhin V. L., Vorontsov A. N., Murzakhanov G. K. (1988). Technological problems of mechanics of structures made of composite materials. *Mechanics of composite materials*, **23**, 608–625. <https://doi.org/10.1007/BF00605687>
9. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. (2020). Prepreg tack: a review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer composites*, **41**, No. 9, 3440–3458. <https://doi.org/10.1002.pc.25642>
10. Bychkov A. S., Kondratiev A. V. (2019). Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. *J. superhard Materials*, **41**, No. 1, 53–59. <http://doi.org/10.3103/S1063457619010088>
11. Campbell F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites*. Elsevier Science, 532 p.
12. Castanie B., Bouvet C., Malo Ginot. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites part C*, **1**, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>
13. Deng B., Shi Y., Yu T., Zhao P. (2020). Influence mechanism and optimization analysis of technological parameters for the composite prepreg tape winding process. *Polymers*, **12**, No. 8, 1843. <https://doi.org/10.3390/polym12081843>
14. Fomin O., Logvinenko O., Burlutsky O., Rybin A. (2018). Scientific substantiation of thermal leveling for deformations in the car structure. *Int. J. engineering & technology*, **7**, No. 4.3, 125–129. <http://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19721>

15. Gaydachuk A. V., Slivinskiy M. B., Golovanevskiy V. A. (2006). Static electricity build-up considerations in manufacture of cores for sandwiched composite materials structures. *Materials forum*, **30**, 103–109.
16. Jaeger J. C. (1969). *Elasticity, fracture and flow*. Springer, 268 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6024-7>
17. Jinno M., Sakai S., Osaka K., Fukuda T. (2003). Smart autoclave processing of thermoset resin matrix composites based on temperature and internal strain monitoring. *Adv. composite material*, **12**, No. 1, 57–72. <https://doi.org/10.1163/156855103322320374>
18. Karandashov O., Avramenko V. (2017). Studies of thermal stability of epoxy compound for glass-fiber pipes. *Chemistry & chemical technology*, **11**, No. 1, 61–64. <https://doi.org/10.23939/chcht11.01.061>
19. Kolosov A. E., Sakharov A. S., Sivetskii V. I., Sidorov D. E., Sokolskii A. L. (2012). Substantiation of the efficiency of using ultrasonic modification as a basis of a production cycle for preparing reinforced objects of epoxy polymer composition. *Chemical and petroleum engineering*, **48**, 391–397. <https://doi.org/10.1007/s10556-012-9629-9>
20. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. (2015). Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. *Chemical and petroleum engineering*, **51**, 493–500. <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0075-3>
21. Kondratiev A. V. (2020). A concept of optimization of structural and technological parameters of polymer composite rocket units considering the character of their production. *Space Science and Technology*, **26**, No. 6 (127), 5–22. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005>
22. Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E. (2021). Mathematical analysis of technological parameters for producing superfine prepreps by flattening carbon fibers. *Mechanics of Composite Materials*, **57**, № 1. P. 91–100. <https://doi.org/10.1007/s11029-021-09936-3>
23. Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. (2019). Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*, **25**, No. 4 (119), 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>
24. Korotkov V. N., Chekanov Y. A., Rozenberg B. A. (1989). Nonisothermal curing of articles formed from polymeric composite materials in the winding process. *Mechanics of composite materials*, **25**, 73–78. <https://doi.org/10.1007/BF00608454>
25. Mustafa L. M., Ismailov M. B., Sanin A. F. (2020). Study on the effect of plasticizers and thermoplastics on the strength and toughness of epoxy resins. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, **4**, 63–68. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/063>
26. Nemirovskii Y. V., Yankovskii A. P. (2002). Effect of the thermal action and thermosensitivity of phase materials on the load-carrying capacity of momentless shells with an equal-stressed reinforcement. *Mechanics of composite materials*, **38**, 525–538. <https://doi.org/10.1023/A:1021778626055>
27. Nikolaev V. P., Pichugin V. S., Korobeinikov A. G. (1999). Effect of molding conditions on fracture mechanisms and stiffness of a composite of grid structure. *Mechanics of composite materials*, **35**, 49–54. <https://doi.org/10.1007/BF02260811>
28. Rodichev Y. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. (2018). Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic load. *Strength of materials*, **50**, No. 6, 868–873. <http://doi.org/10.1007/s11223-019-00033-4>
29. Rodionov V. V. (2019). Optimization of molding the polymeric composite material with improved characteristics. *Plasticheskie massy*, **3-4**, 55–58. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-3-4-55-58>
30. Russell John D., Madhu S. Madhukar Mohamed S., Genidy Andre Y. (2000). Lee A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, Part III: Correlating stress history to viscosity, degree of cure and cure shrinkage. *J. composite materials*, **34**, No. 22, 1925–1947.
31. Teters G., Kregers A. (2000). Optimization of a composite plate buckling under thermal action with account of reliability. *Mechanics of composite materials*, **36**, 453–458. <https://doi.org/10.1023/A:1006750431407>
32. Tomashevskii V. T., Yakovlev V. S. (2004). Models in the engineering mechanics of polymer-matrix composite systems. *Int. applied mechanics*, **40**, No. 6, 601–621. <https://doi.org/10.1023/B:INAM.0000041391.28104.b7>
33. Verbitskaya N. A. (2001). Influence of complex compounds of rhenium (V), molybdenum (V) with macrocyclic ligands on processes of structure formation in epoxyurethane binder. *Plasticheskie massy: sintez svoystva pererabotka primenenie*, **7**, 10–14.

Стаття надійшла до редакції

19.04.2021

Received 19.04.2021

Прийнято до друку

20.01.2022

Accepted 20.01.2022

*O. V. Haidachuk*<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Tech., Professor, Consultant Professor

E-mail: a.gaydachuk@khai.edu

*A. V. Kondratiev*<sup>2</sup>, Dr.Sci. in Tech., Professor, Full Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>

E-mail: kondratyev\_a\_v@ukr.net; andrii.kondratiev@kname.edu.ua

*T. P. Nabokina*<sup>3</sup>, Ph.D. in Tech., Associate Professor, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0019-5066>

E-mail: t.nabokina@khai.edu

<sup>1</sup>Ningbo University of Technology

201 Fenghua Rd, Jiangbei Qu, Ningbo Shi, Zhejiang Sheng, China

<sup>2</sup>O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”

Kharkiv, Ukraine

### OPTIMIZATION OF PRESSURE AND TIME OF COMPOSITE PRODUCTS MOLDING AT THE TEMPERATURE OF MINIMUM BINDER VISCOSITY

The technological process of composite products' molding consists in giving them non-a reversible shape using shape-generating molding tools through polymerization of the binder at a certain temperature and pressure varying in time. The paper deals with the research of technological parameters of the most common practical method of molding products made of polymeric composite materials, pre-formed of prepregs. The mathematical model of filling with a binder of inter-fiber space of the reinforcing material for the polymeric composite material with the varying fiber packing densities, from quadratic to hexagonal one, depending on the type of reinforcing material, has been further developed.

A new method for optimization of the pressure and time of composite products' molding at the temperature of the minimum binder viscosity has been developed. The method is implemented by analytical dependencies, which establish the optimal time intervals and pressure of molding on the section of the temperature and time diagram, associated with the ability of the operating equipment (oven, autoclave) to provide the maximum possible rate of temperature rise in order to “soften” the binder in prepreg to its minimum viscosity. It is shown that energy consumption for the re-formation of the tetragonal structure of the polymeric composite material into hexagonal one is ten times higher than the costs for the tetragonal structure formation. For example, re-formation of the tetragonal structure at volume content of the binder of 0.4 into dense hexagonal structure requires 66.7 times increase in pressure. Obtained results allow establishing the economically feasible level of pressure and time of composite products' molding while ensuring their specified quality.

**Keywords:** prepreg, polymerization of the binder, inter-fiber space, quadratic and hexagonal structure.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>  
УДК 621.791.754.6.3:620.193.28

**Л. І. НИРКОВА**<sup>1</sup>, зав. відділу, д-р техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>  
E-mail: lnyrkova@gmail.com, Nyrkova@paton.kiev.ua

**Т. М. ЛАБУР**<sup>1</sup>, голов. наук. співроб., старш. наук. співроб., д-р. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4064-2644>  
E-mail: labur@paton.kiev.ua

**Є. І. ШЕВЦОВ**<sup>2</sup>, заст. Генерального конструктора — Головний конструктор  
E-mail: info@yuzhnoye.com

**О. П. НАЗАРЕНКО**<sup>2</sup>, нач. відділу

**А. В. ДОРОФЄЄВ**<sup>2</sup>, нач. групи

**С. О. ОСАДЧУК**<sup>1</sup>, наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9559-0151>

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

**М. Р. ЯВОРСЬКА**<sup>1</sup>, провід. інж.  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2016-6289>

**А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua

**В. Є. ФЕДОРЧУК**<sup>1</sup>, старш. наук. співроб., канд. техн. наук  
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9929-3231>

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України  
вул. К. Малевича 11, Київ, Україна, 03150

<sup>2</sup>Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»  
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

## КОМПЛЕКС ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ СПЛАВУ 2219 У СТАНІ Т62 В УМОВАХ, ЩО МОДЕЛЮЮТЬ УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Досліджено комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219, виконаного однопрохідним зварюванням неплавким електродом вздовж та поперек прокату, термообробленого до стану Т62 в рідкому амелі та його парах при температурі 50°C протягом 45 діб. Показники пластичності та міцності зразків зварних з'єднань сплаву 2219 у поздовжньому напрямку становлять: межа плинності зварного з'єднання — 301...317 МПа, основного металу — 295...297 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 409...415 МПа, основного металу — 422...425 МПа, відносне видовження становить 4.0...5.8 % та 17.6...19.1 % відповідно; у поперечному напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 309...331 МПа, основного металу — 304...307 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 392...414 МПа, основного металу — 428...433 МПа, відносне видовження — 2.1...3.3 % та 12.6...15.0 % відповідно. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому напрямку дорівнює 0.96, у поперечному — 0.94. Зварні з'єднання в цьому середовищі є стійкими проти корозійного розтріскування*

Цитування: Ниркова Л., Лабури Т., Шевцов Є., Назаренко О., Дорофєєв А., Осадчук С., Яворська М., Покляцкий А., Федорчук В. Комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 в умовах, що моделюють умови експлуатації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 14—29. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.014>

та міжкристалітної корозії, тривкість проти розшарувальної корозії оцінена балом 2. Сплав 2219 у стані T62 в амлі оцінено як «стійкий», в парах амлі — як «підвищено стійкий». Після витримування в амлі та парах амлі показники міцності зразків основного металу та зварних з'єднань в обох напрямках майже не змінюються, показники пластичності змінюються немонотонно: межа плинності основного металу збільшується на 5...6 %, зварних з'єднань — зменшується на 6...7 %, відносне видовження основного металу зменшується на 5...16 %, зварних з'єднань — приблизно на 20 %. Незалежно від напрямку виконання зварювання відносно прокату металу злами переважно мають в'язкий характер руйнування. Після витримування в амлі коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому та поперечному напрямках однакові та дорівнюють 0,91, після витримування в парах амлі — 0,95 у поздовжньому напрямку і 0,96 поперечному.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав 2219, зварні з'єднання, термооброблення, корозійна тривкість, механічні властивості, мікроструктура, механічне руйнування при розтягуванні.

## 1. ВСТУП

Алюмінієвий сплав 2219 є найбільш використуваним матеріалом для виготовлення паливних баків, має унікальну комбінацію властивостей: зварюваність, високу міцність при достатньо низькій вазі та криогенну стійкість. Сплав AA 2219 успішно застосовується в різних системах ракет-носіїв («Сатурн-5», «Аполлон», «Спейс Шаттл» тощо) [18].

Під час аргонодугового зварювання сплаву 2219 неплавким електродом часто спостерігається утворення пор у металі шва. Для запобігання цього в роботі [14] запропоновано технологію зварювання з використанням спеціальних активізаційних агентів ( $\text{AlF}_3$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{KF-AlF}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ ) при умові використання на негативному електроді постійного струму, що сприяє усуненню зварювальної пористості завдяки суттєвому зменшенню впливу термічного циклу зварювання на основний метал та зону термічного впливу.

Вважається [22], що міцність і пластичність зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву 2219, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом, є суперечливими через ряд геометричних і металургійних чинників. Зміна ширини лицьового зварного шва, глибини проплавлення зварного шва та інших геометричних параметрів може по-різному впливати на механічні властивості з'єднань.

В роботі [23] показано, що оптимальні властивості з'єднання сплаву 2219-C10S під час розтягу можна отримати застосуваннями двопрхідного зварювання. Для покращення пластичних властивостей зварних з'єднань сплаву 2219-T8 при виробництві великих паливних баків у роботі [21] застосовувався новий технологічний при-

йом зварювання — багатопрхідне зварювання з поворотом, що дало змогу отримати з'єднання з коефіцієнтом міцності на розрив 70 % та видовженням понад 4 %. Механізм вдосконалення геометрії зварного шва обумовлений пониженою швидкістю зміни деформації та концентрацією напружень по осі шва. Зазвичай посудини з алюмінію 2219, як правило, піддають термічному обробленню після зварювання [25]. Для термооброблення застосовують різні режими, зокрема T81 (старіння заготовок, термооброблених до стану T4, при 177 °C протягом 18 год) і T87 (старіння заготовок, термооброблених з наступною деформацією 8 % до стану T37, при 163 °C протягом 24 год).

Термооброблення після зварювання зварних з'єднань сплаву 2219 у стані T62 (старіння протягом 36 год при 190 °C) підвищує як міцність, так і пластичність [18].

Найслабшою зоною стикових зварних з'єднань є зона термічного впливу. У стиковому зварному з'єднанні сплаву 2219-T87, отриманому аргонодуговим зварюванням неплавким електродом у два проходи [16], значення мікротвердості в цих зонах становить 76 та 78 НВ відповідно та збільшується по мірі віддалення від лінії сплавлення, за винятком зони на відстані 4.5 мм від лінії сплавлення. Середній розмір зерен в обох зонах становить приблизно 74.4 та 79.2 мкм, в зоні термічного впливу — 41.5, 44.9 мкм, в основному металі — 43.4 мкм. Отже, збільшення розміру зерен, зменшення вмісту легуючих елементів, їхня сегрегація та виділення другої фази розглядаються як основні причини розміщення зварного з'єднання, тоді як випадіння вторинних фаз є основним чинником роз-

міцнення зони термічного впливу. Термічне оброблення після зварювання зменшує кількість і розмір евтектичної структури або  $\theta$ -фаз [24, 25] та призводить до того, що структура зварного шва стає схожою зі структурою інших зон, а з'єднання має оптимальні розтягувальні властивості (зразки руйнуються в зоні зварного шва).

Циклічне термічне оброблення зварних з'єднань сплаву 2219, виконаних дуговим зварюванням неплавким електродом в інертному газі струмом змінної полярності [13], сприяє утворенню в зоні термічного впливу, що прилягає до лінії сплавлення, зон з максимальною та мінімальною твердістю. Максимальна твердість збільшується з температурними циклами циклічного термічного оброблення за рахунок утворення зон Гіньє — Престона, тоді як мікротвердість в інших зонах залишається незмінною. Експериментальні результати показують, що циклічне термічне оброблення призводить до збільшення межі текучості, але зменшення пластичності зварного з'єднання.

Різна попередня деформація впливає на мікроструктуру та корозійну тривкість алюмінієвого сплаву 2219 [15]. У процесі старіння розмір зерен поступово зменшується, а розподіл фаз ефективно покращується, що призводить до підвищення міцності на розрив та корозійної стійкості. Наявність великої кількості дислокацій, індукованих процесами попередньої деформації, забезпечує умови для переважного осадження  $\theta'$ -фаз. Дрібнодисперсна і дисперсна  $\theta$ -фази для цього сплаву, підданого попередній деформації на 20 %, ускладнюють рух дислокацій, що підвищує міцність на розрив. Через нерівномірний розподіл  $\theta'$ -фази межа міцності при розтягуванні незначно зменшується, якщо попередня деформація досягає 30 %. Рівень корозійної стійкості різних попередніх деформацій після процесу старіння від найвищого до найнижчого становить: 20 % > 30 % > 10 % > 5 %, що пов'язано зі зміною розподілу  $\theta'$ -фаз та ширини зони без таких фаз. Механічні властивості та локальна корозійна тривкість крупнозернистих та ультрадисперсних сплавів 2219, термостабілізованих після старіння, відрізняються [12]. Твердість і міцність ультрадисперсного сплаву значно вищі,

а сприйнятливість до міжкристалітної корозії — нижча порівняно з крупнозернистим сплавом. Однак стійкість проти розшарувальної корозії та електрохімічної корозії ультрадисперсного сплаву нижче, ніж крупнозернистого. Крім того, ультрадисперсний сплав менш чутливий до локальної корозії залежно від умов старіння порівняно з крупнозернистим сплавом. Відмінності механічних властивостей та схильності до локальної корозії цих сплавів залежно від термічного оброблення після старіння в основному зумовлені складною взаємодією зерен різних розмірів, дислокації та випадіння фаз старіння.

З'єднання алюмінієвого сплаву 2219, отримане аргонодуговим зварюванням неплавким електродом в інертному газі на струмі змінної полярності, піддавали термообробленню при 535 °C протягом 30 хв, загартуванню у воді та штучному старінню при 175 °C протягом 12 год [26]. Виявилось, що завдяки термообробленню вдалося досягти формування більш однорідної мікроструктури, збільшення міцності на розрив на 44 %, при цьому коефіцієнт міцності з'єднання становив 76 %. Корозійна стійкість з'єднання після термооброблення була вищою, ніж у стані після зварювання. Зона термічного впливу залишилася найбільш нестійкою до корозії, її сприйнятливість до корозії пояснювалась розчиненням та сегрегацією фази  $Al_2Cu$  вздовж границь зерен.

Проаналізовано вплив різних параметрів зварювання на механічні властивості та поведінку при розтягуванні аргонодугових зварних з'єднань [20]. Було обрано чотири різні кути розділки крайок: 60°, 70°, 80° та 90°, щоб з'ясувати тенденцію формування мікроструктури та її вплив на якість зварного шва. Механічні властивості оцінювали за показником твердості за Віккерсом  $HV_1$ . Мікроаналіз досліджуваних зразків, отриманих з використанням різних струмів 165, 180, 200 А з однаковим кутом розділки крайок 90°, проводили у зоні сплавлення, зоні переходу та ЗТВ; всі зображення продемонстрували добре проплавлення та чіткий перехід від попередньої до наступної зони. Випробовування розтягом зварних з'єднань поперек прокату проводили для оцінки впливу параметрів зварю-



вання та геометрії розділки крайок на міцність з'єднання та його поведінку під час експлуатації. Міцність зварних швів на розрив пов'язана з параметрами зварювання. Обраний зварювальний струм 180 А забезпечив найвищу міцність на розрив досліджуваних зразків; так само, як правильний вибір кута розділки кромки (90°) забезпечує задовільне проплавлення і високу якість основних зварних швів. Результати показали, що формування зварного шва залежить від зварювального струму.

Використання адитивної технології зварювання неплавким вольфрамовим електродом в інертному газі тонколистового сплаву 2219 [11] показало, що середня твердість становить 77.5 HV<sub>0,2</sub>, а матеріали нечутливі до нагрівання під час зварювання. Жодної суттєвої різниці твердості не встановлено між наплавленими та внутрішніми шарами. Випробування на розтяг проводили на зразках вздовж зварного шва та напрямку прокату. Середня межа міцності дорівнює 237 МПа, що становить 57 % від значення межі міцності сплаву у стані постачання 2219-Т6. Аналіз показує, що низьке значення міцності на розрив можна пояснити відсутністю ефекту зміцнення фаз під час зварювання. Матеріал має ізотропні властивості при розтягуванні. Фрактографічні дослідження показали, що  $\theta$ -фази є ініціаторами тріщин. Ефект зменшення площин навантаження через смугоподібну розподілену пористість є незначним у напрямку зварювання. Однак у напрямку прокату це впливає на шлях поширення тріщини. Зварні з'єднання, отримані електронно-променевим зварюванням алюмінієвого сплаву 2219, забезпечують набагато більшу міцність та вищу корозійну тривкість, ніж з'єднання, отримані неплавким електродом [19]. Це зумовлено, крім тонкої рівномірної зеренної структури, наявніс-

тю частково розкладених фаз у металі шва, більш дрібною мікропористістю та рівномірним розподілом міді у матриці. Зварні шви, виконані зварюванням тертям, мають кращі показники, ніж аргонодугові шви, виконані аргонодуговим зварюванням неплавким електродом струмом змінної полярності, хоча зварювальні процеси сприяли зниженню механічних властивостей зварних з'єднань порівняно з основним металом сплаву 2219 [17]. Згідно з фрактографічним та мікροструктурним аналізом, в зоні термічного впливу, що містила рафіновану та рівновісну структуру, відбувалась динамічна перекристалізація, та зразки під час розтягу розірвались по зоні перегріву. Застосування змінної полярності при зварюванні може призвести до утворення дефектів, таких як висока концентрація газових пор, і зона сплавлення стає слабшою.

Мета роботи — дослідити комплекс властивостей зварних з'єднань, виконаних ручним аргонодуговим зварюванням вздовж та поперек напрямку прокату, та термооброблених до стану Т62, від яких залежить працездатність зварного виробу в умовах експлуатації.

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В роботі досліджено алюмінієвий сплав системи легування Al-Cu 2219-Т31 товщиною 3 мм. Аналіз хімічного складу проводили спектральним методом на спектрометрі «Спектровка-1000» фірми «Baird». Отримані результати порівнювали з хімічним складом сплаву, наведеним в AMS-QQ-A-250/30A [1], в табл. 1.

Перед зварюванням зразки обробляли у 10 % розчині NaOH та освітляли у 30 % розчині HNO<sub>3</sub>. Зварювання заготовок проводили в горизонтальному положенні неплавким вольфрамовим електродом з лантановим покриттям з

Таблиця 1. Хімічний склад зразка сплаву 2219-Т31 товщиною 3 мм

Сплав	Масова частка елементів, %									
	Cu	Mn	Zr	V	Ti	Fe	Si	Zn	Mg	Інші: кожен/в цілому
Зразок	6.7	0.34	0.18	—	0.05	0.16	0.09	0.03	0.02	0.01 (Ni)
AMS-QQ-A-250/30A	5.8...6.8	0.20...0.40	0.10...0.25	0.05...0.15	0.02...0.10	≤0.30	≤0.20	≤0.10	≤0.02	≤0.05/≤0.15

використанням присадного дроту марки Св 2319 діаметром 1.6 мм ( $I_{зв} = 280$  А,  $V_{зв} = 20$  м/год, швидкість подачі присадного дроту 117 м/год). Джерело живлення MW-450 фірми «Fronius». Використовувався змінний струм з прямокутною формою хвилі частотою 200 Гц. Зону сплавлення захищали аргоном. Повне проплавлення зварюваних кромки за один прохід і формування проплаву (кореня) досягалося за наявності змінної підкладки з нержавіючої сталі з прямокутною формою канавки шириною 4 мм та глибиною 1 мм, що дозволило отримати якісне формування стикових швів з технологічним посиленням.

Якість формування швів стикових з'єднань сплаву 2219-T31 оцінювали візуально та методом рентгенографії (ГОСТ 7512 [2]) на рентгенівській установці РАП-150/300. Щільність металу шва контролювали на приладі «Денситометр ДП-30».

Для вимірювання геометричних параметрів швів використовували електронний штангенциркуль марки АРТ-34460-150 з ціною поділки 0.01 мм.

Зі зварних заготовок виготовляли зразки для механічних та корозійних випробувань згідно з відповідними нормативними документами. Зразки термооброблювали до стану Т62 (повний цикл термічного оброблення) — гартування за режимом  $T = 535 \pm 5$  °С,  $\tau = 50$  хв (охолодження у воді) з подальшим штучним старінням за режимом  $T = 190 \pm 5$  °С,  $\tau = 36$  год.

Корозійні випробування проводили в амлі та парах амлі при температурі 50 °С безперервно протягом 45 діб на базі випробувальної лабораторії КБ «Південне», після чого оцінювали корозійну тривкість (швидкість суцільної корозії, стійкість проти міжкристалітної корозії (МКК), розшарувальної корозії та корозійного розтріскування) та механічні властивості.

Оцінювання стійкості зразків основного металу проти суцільної корозії проводили методом масометрії за стандартною методикою. Швидкість втрати маси зразків визначали за зміною маси зразка та тривалості досліджень за формулою

$$K = \frac{\Delta m}{ST} \quad (1)$$

де  $\Delta m = m_1 - m_2$  — корозійні втрати зразка, г;  $m_1$  — маса зразка до випробувань, г;  $m_2$  — маса

зразка після корозійних випробувань;  $S$  — площа поверхні зразка, м<sup>2</sup>;  $T$  — тривалість досліджень, год.

Швидкість корозії обчислювали за формулою

$$\Pi = \frac{8760 \cdot K}{d}, \quad (2)$$

де  $K$  — швидкість корозії, г · м<sup>-2</sup> · год<sup>-1</sup>;  $d$  — щільність металу, г/см<sup>3</sup>; 8760 — кількість годин у році.

При обчисленнях враховувалось значення щільності алюмінієвих сплавів 2.7 г/см<sup>3</sup>.

Оцінювання стійкості проти розшарувальної корозії проводили згідно з ГОСТ 9.904 [3] на зразках основного металу та зварних з'єднань. Під час оцінювання відмічали зміну кольору, наявність виразок та відшарувань на робочих поверхнях зразків, тріщин на торцях. Прийняті такі умовні позначення. Літерою «А» позначено поверхню, на якій нанесено маркування, а для зварних з'єднань — поверхню з лицьовим швом, «Б» — зворотна поверхня, для зварних з'єднань — поверхня з проплавленням; 1, 2 — торці сторін довжиною 60 мм (80 мм для зварних з'єднань), 3, 4 — торці сторін довжиною 40 мм (25 мм — для зварних з'єднань).

Оцінювання стійкості проти міжкристалітної корозії проводили металографічним методом при збільшенні 100<sup>×</sup> згідно з ГОСТ 9.021 [4]. Випробування проводили на зразках зварних з'єднань, оцінювали всі зони зварного з'єднання — основний метал, зону термічного впливу та зварний шов.

Випробування стійкості проти корозійного розтріскування проводили на прямокутних зразках розміром 150.0 × 25.0 × 3.0 мм. Зразки навантажували за чотириточковою схемою вигину згідно з ГОСТ 9.901.2 (метод 4), рівень постійної деформації був узгоджений із «ДП КБ «Південне» та становив 957 кгс/см<sup>2</sup>. Після випробувань зразки оглядали за допомогою лупи.

Визначення та оцінювання механічних властивостей виконували на плоских зразках з технологічним посиленням на лицевій та зворотній поверхнях шва. Механічні випробування проводили згідно з ГОСТ 1497 [5] на машині Instron-1126 зі швидкістю переміщення траверси 6 мм/хв до руйнування. Для контролю показни-

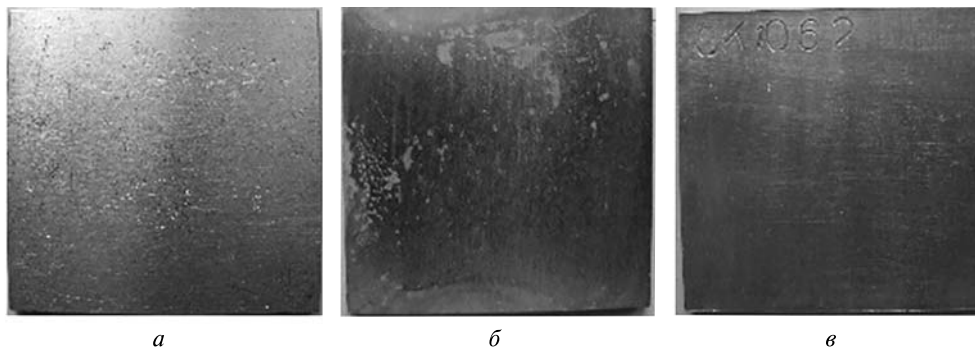


Рис. 1. Зовнішній вигляд поверхні основного металу алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62, до (а) та після випробувань в амлі (б) та парах амлі (в)

ка відносного подовження зразків застосовували екстензометр № G-51-12-M-A. Під час випробувань за допомогою персонального комп'ютера безперервно реєстрували показники навантаження та деформації, за результатами яких розраховували межу плинності, тимчасовий опір розриву (межу міцності) та відносне подовження.

Металографічний аналіз основного металу та зварних з'єднань до та після корозійних випробувань виконували за допомогою мікроскопа ММТ-1600В. Дослідження провадились на шліфах вирізаних із зразків зварних з'єднань, зварених вздовж (Д) і поперек (П) прокату листів. Мікроструктуру виявляли травленням у розчині поверхні зразка, потім електролітичним поліруванням в розчині: 1000 см<sup>3</sup> хлоридної кислоти + 75 см<sup>3</sup> крижаної оцтової кислоти.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

**3.1. Геометричні параметри швів.** Геометричні параметри швів вимірювали після зварювання заготовок:  $B$  — ширина шва з лицевої поверхні з'єднань,  $H$  — ширина шва зі зворотної поверхні з'єднань (кореня шва),  $\delta$  — глибина проплавлення основного металу,  $b$  — висота опуклостей технологічного посилення,  $h$  — висота кореня шва. Розміри швів становлять: ширина швів у зварних з'єднаннях, зварених вздовж прокату, становить від 9.56 до 9.72 мм, поперек прокату — від 9.47 до 9.65 мм. Коефіцієнт форми шва відповідно до формули  $K = B/(b+\delta)$  для з'єднань, зварених вздовж та поперек прокату, дорівнює 2.13 та 2.03 відповідно.

**3.2. Дослідження стійкості проти загальної та локальної корозії.** Після випробувань в амлі спостерігалось нерівномірне потемніння поверхні зразків (див. рис. 1 та табл. 2), та утворення корозійних плям різних розмірів, які вкривали площу від 10 до 20 %. Після контакту з парами амлі потемніння поверхні також було нерівномірним, ступінь ураження поверхні корозією становив від 10 до 30 %. Плями характеризуються зміною кольору поверхневого шару (потемнінням) і малою глибиною ураження.

Після видалення продуктів корозії поверхні залишилися блискучими, без видимих локальних уражень. За результатами візуального огляду після випробувань в амлі (рідкому та парах) корозію алюмінієвого сплаву 2219 ідентифіковано згідно з ГОСТ 9.908 як суцільну нерівномірну, вид уражень — корозійні плями.

Швидкісні показники суцільної корозії зразків основного металу алюмінієвого сплаву 2219 у стані Т62, визначені згідно з ГОСТ 9.908, становлять: швидкість втрати маси в амлі — 0.00130 г/(м<sup>2</sup>·год), в парах амлі — 0.00289 г/(м<sup>2</sup>·год); лінійна швидкість корозії в амлі — 0.00429 мм/рік, в парах амлі — 0.0095 мм/рік.

За десятибальною шкалою корозійної стійкості згідно з ГОСТ 9.502 [6] стійкість алюмінієвого сплаву 2219, термообробленого до стану Т62 в амлі, оцінена балом 2, в парах амлі — балом 3, що відповідає групі стійкості «стійкий» та «підвищено стійкий» відповідно.

Стійкість основного металу сплаву 2219 проти розшарувальної корозії після випробувань в

Таблиця 2. Результати оцінювання стійкості проти розшарувальної корозії зразків основного металу сплаву 2219 та зварних з'єднань вздовж (Д) та поперек (П) прокату, термооброблених до стану Т62, після випробувань в амлі та його парах

Маркування	На-прямок прокату	Умови випробувань	Назва показника											
			Характер зміни зовнішнього виду зразків		Найбільший діаметр відшарування, мм		Площа відшарування на кожній поверхні, %		Сумарна довжина торців з тріщинами, мм				Стійкість проти РСК згідно з ГОСТ 9.904, бал	
			А	Б	А	Б	А	Б	1	2	3	4		
Основний метал	Д	аміл пари амілу	Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
			Зміна кольору плямами, Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Зварне з'єднання	Д	аміл пари амілу контр.	Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
			Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Основний метал	П	аміл пари амілу контр.	Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
			Легке потемніння, плями з кольорами мінливості	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
			Без змін	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
РСК.11.81	П	аміл пари амілу контр.	Легке потемніння	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Легке потемніння			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
Без змін			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	

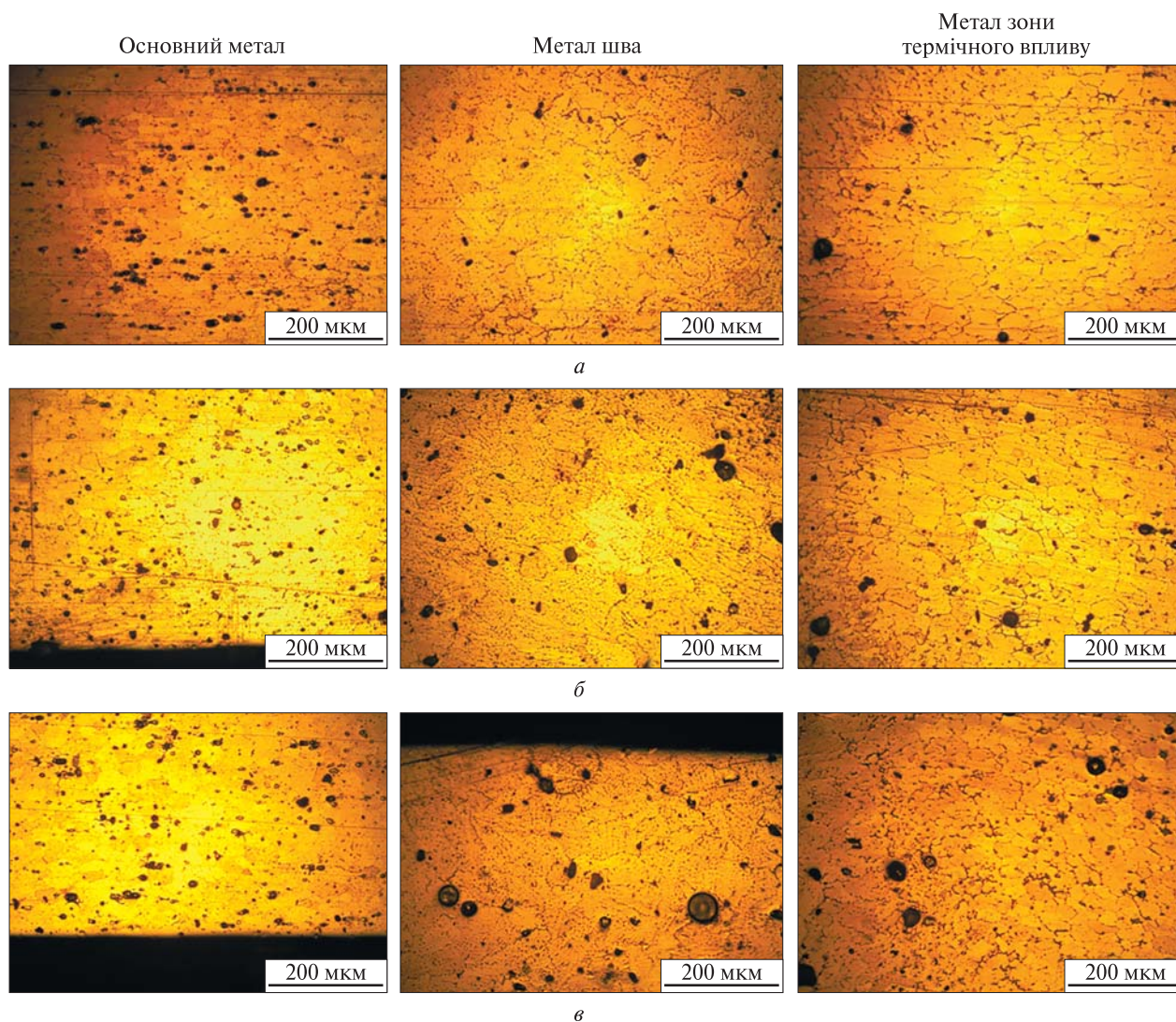
амлі та його парах та зварних з'єднань вздовж та поперек прокату, термооброблених до стану Т62, відповідає балу 2 згідно з ГОСТ 9.904.

Таким чином, на стійкість зварних з'єднань основного металу проти розшарувальної корозії в амлі та його парах не впливає напрямок прокату та термічний цикл зварювання.

Після корозійних випробувань в амлі та парах амілу міжкристалітного розтріскування по границях зерен зварних з'єднань сплаву 2219 не виявлено, тобто ці з'єднання є стійкими проти МКК згідно з ГОСТ 9.021. Тому можна зробити висновок, що на стійкість проти МКК не впливає напрямок прокату та термічний цикл зварювання.

Зразки зварних з'єднань сплаву 2219 вздовж та поперек прокату у стані Т62 є стійкими і проти корозійного розтріскування в амлі та його парах, оскільки корозійних тріщин не виявлено.

**3.3. Дослідження мікроструктури.** Мікроструктура основного металу сплаву 2219-Т31 [2, 7–9] складається з багатої алюмінієм  $\alpha$ -фази (твердий розчин) і стабільної  $\theta$ (CuAl<sub>2</sub>)-фази. До числа проміжних фаз відносяться  $\theta'$ (CuAl<sub>2</sub>) і  $S'$ (Al<sub>2</sub>CuMg). Основними легуючими елементами сплаву є мідь і марганець. Наявність в структурі сплаву фаз  $\theta$ (Al<sub>2</sub>Cu),  $T$ (Al<sub>12</sub>Mn<sub>2</sub>Cu), Al<sub>3</sub>Zr Al<sub>11</sub>V забезпечує належний рівень фізико-механічних властивостей як самого сплаву, так і його



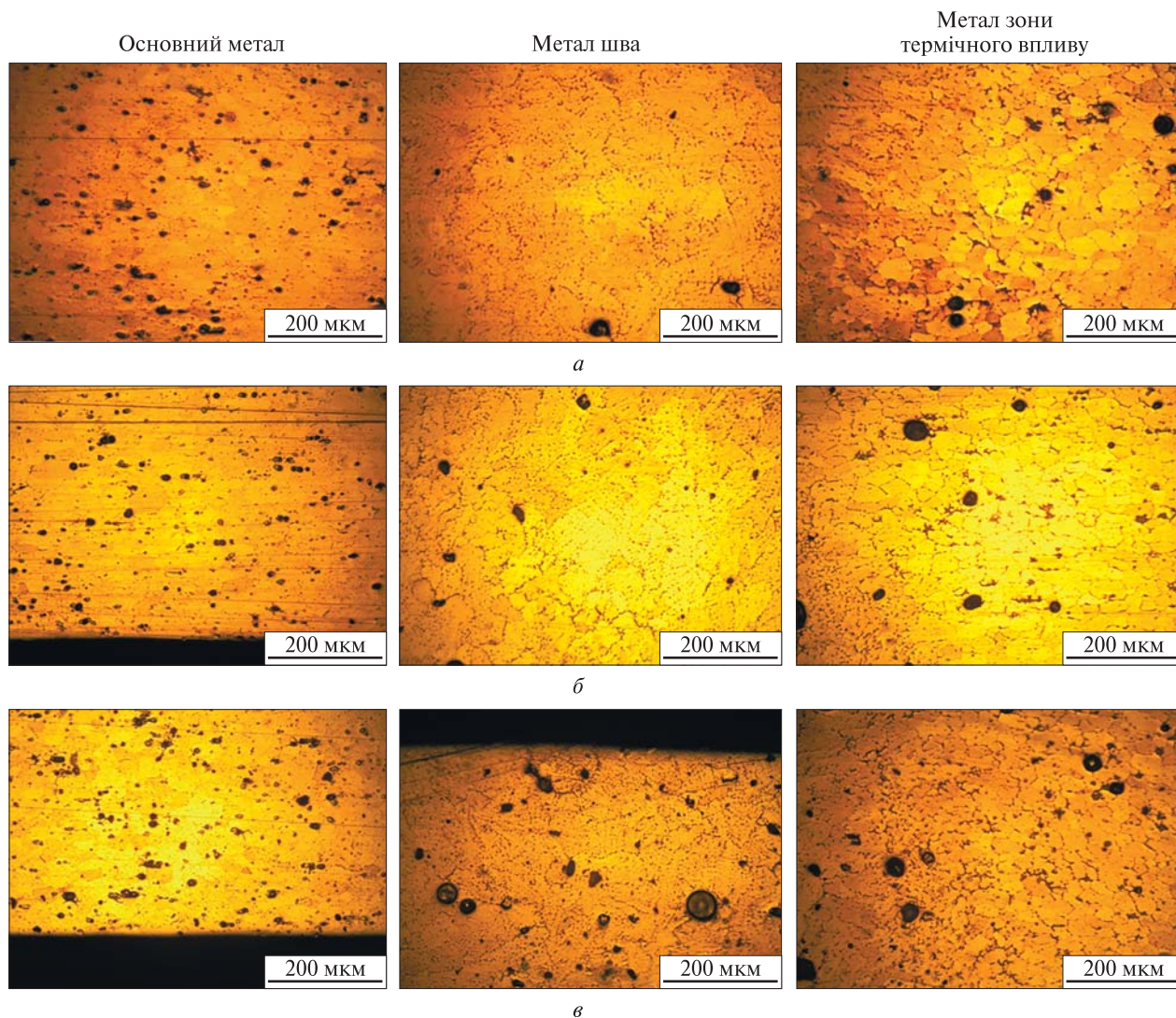
**Рис. 2.** Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62, уздовж (Д) прокату до корозійних випробувань (а), після випробувань в амелі (б); після випробувань в парах амелу (в)

зварних з'єднань. Це зумовлено характерним особливим механізмом розпаду твердого розчину та морфологією розташування фазових виділень при нагріванні, а також співвідношенням їхньої об'ємної долі у структурі. Кількість фазових складових визначається сумою легуючих елементів для конкретного сплаву.

Металографічні дослідження структури основного металу сплаву 2219 у стані Т62 до корозійних випробувань (рис. 2, а) показали, що метал також має характерні ознаки розташування

структурних складових (зерен, фазових включень тощо), притаманних металу у стані Т81: зерна твердого розчину мають витягнуту вздовж напрямку прокату форму, а неметалеві включення розташовані рівномірно по перерізу листів.

Вимірювання геометричних розмірів зерен у структурі не виявило анізотропію основного металу, оскільки як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку їхні розміри та характер розташування збігаються. У поздовжньому напрямку (рис. 2, а) розмір зерен в середньому становить 60



**Рис. 3.** Мікроструктура зон зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 2219, термооброблених до стану Т62 поперек прокату до корозійних випробувань (а), після випробувань в амілі (б); після випробувань в парах амілу (в)

мкм вздовж прокату та 25 мкм перпендикулярно до товщини листів, у поперечному (рис. 3, а) — 60 і 30 мкм відповідно. Металографічні дослідження структури методом оптичної мікроскопії в темному полі дозволило встановити, що темні включення неправильної форми, розташовані рівномірно, є інтерметалідами. Частина включень має сферичну форму з максимальним розміром не більше 12 мкм. Виходячи з їхнього розміру можна припустити, що вони виділилися з твердого розчину при термічному обробленні зразків. Інші

включення овальної форми з максимальним розміром  $35 \times 12$  мкм є наслідком формування литої структури, тобто утворилися на етапі лиття злитків та набули витягнутої форми в процесі їхнього пластичного деформування при прокаті листа (рис. 2). Видимих методом оптичної мікроскопії змін мікроструктури та розміру зерен після корозійних випробувань в амілі (рис. 2, б) та парах амілу (рис. 2, в) не виявлено.

Після корозійних випробувань в амілі (рис. 2, 3, б) та парах амілу (рис. 2, 3, в) будь-яких змін

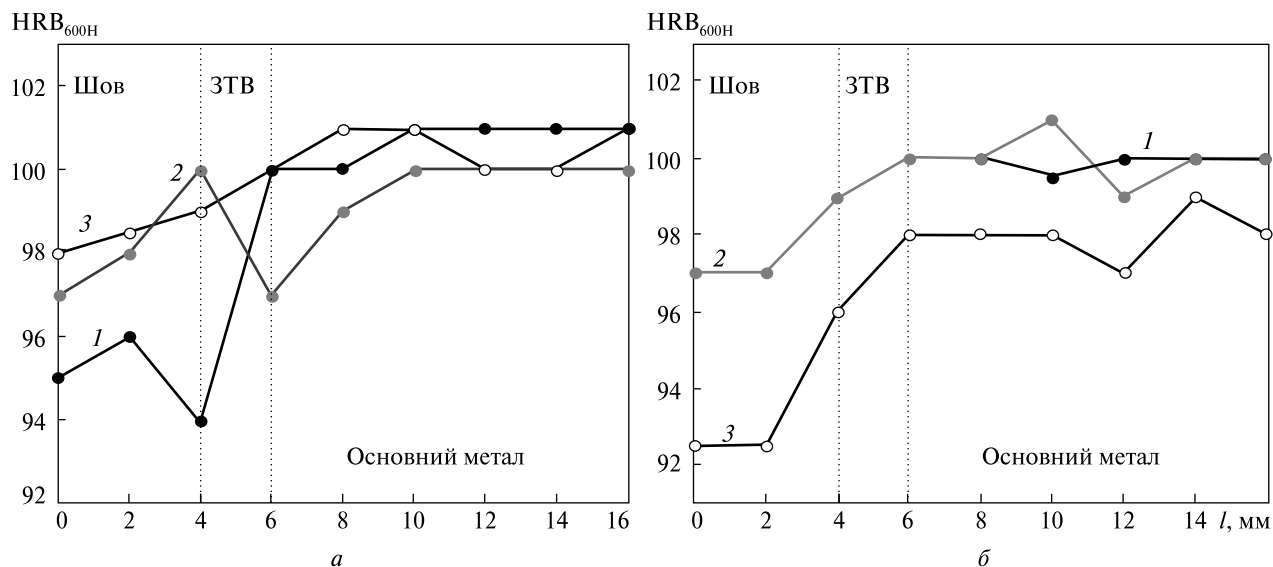


Рис. 4. Розподіл твердості по різних зонах зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 вздовж (а) та поперек (б) прокату до корозійних випробувань (1), після корозійних випробувань в амлі (2), після корозійних випробувань в парах амлі (3)

мікроструктури та розміру зерен в основному металі, металі шва та ЗТВ не спостерігається. Зміна мікротвердості також незначна рис. 4.

#### 3.4. Дослідження механічних властивостей.

Результати випробувань зразків основного металу сплаву 2219 у стані Т62 (рис. 5, а) показали, що межа плинності контрольних зразків, вирізаних вздовж напрямку прокату, становить від 295 до 297 МПа, межа міцності ( $\sigma_B$ ) — від 422 до 425 МПа (рис. 5, б). У зразках, вирізаних у поперечному напрямку, обидва показники вищі:  $\sigma_{0,2} = 304...307$  МПа,  $\sigma_B = 428...433$  МПа (рис. 5, в, г). Відносне подовження також відрізняється і дорівнює 18.4 % для зразків у поздовжньому напрямку та 13.8 % — у поперечному.

Після випробувань в амлі значення межі плинності основного металу сплаву 2219-Т62 поздовжніх зразків збільшується на 2...3 % та становить від 303 до 330 МПа, межа міцності майже не змінюється і дорівнює 421...424 МПа (рис. 5, а, б). Показники пластичності і міцності поперечних зразків дорівнюють 313...317 МПа та 425...429 МПа відповідно (рис. 5, в, г). Відмічено зниження відносного видовження поздовжніх зразків на 15 % (до 15.6 %), поперечних — на 9 % (до 12.5 %).

Витримування поздовжніх зразків основного металу сплаву 2219-Т62 у парах амлі майже не змінює показника  $\sigma_{0,2}$ , значення якого дорівнюють 286...300 МПа. Значення межі міцності при цьому становить 422...426 МПа (рис. 5, а, б). Тобто, під дією парів амлі спостерігається деяке зниження пластичності основного металу сплаву 2219 у стані Т62, на що також вказує зменшення відносного звуження до 15.5 % (майже на 15 %). Для зразків основного металу, вирізаних поперек прокату, спостерігали збільшення межі плинності 3 % до 307...337 МПа, межа міцності після випробувань за таких умов не змінилася і дорівнювала 428 МПа. На втрату пластичних властивостей вказує відносне видовження, яке збільшилось на 5 % (до 14.5 %).

Аналіз результатів випробувань поздовжніх зразків зварних з'єднань до корозійних випробувань показав, що їхня межа плинності становила 301...317 МПа, що дещо вище, ніж для основного металу — 295...297 МПа, (рис. 5, а), а межа міцності становила 409...415 МПа, тобто, навпаки, менше, ніж для основного металу — 422...425 МПа (рис. 5, б). Коефіцієнт міцності контрольних зразків зварних з'єднань дорівнює 0.96.

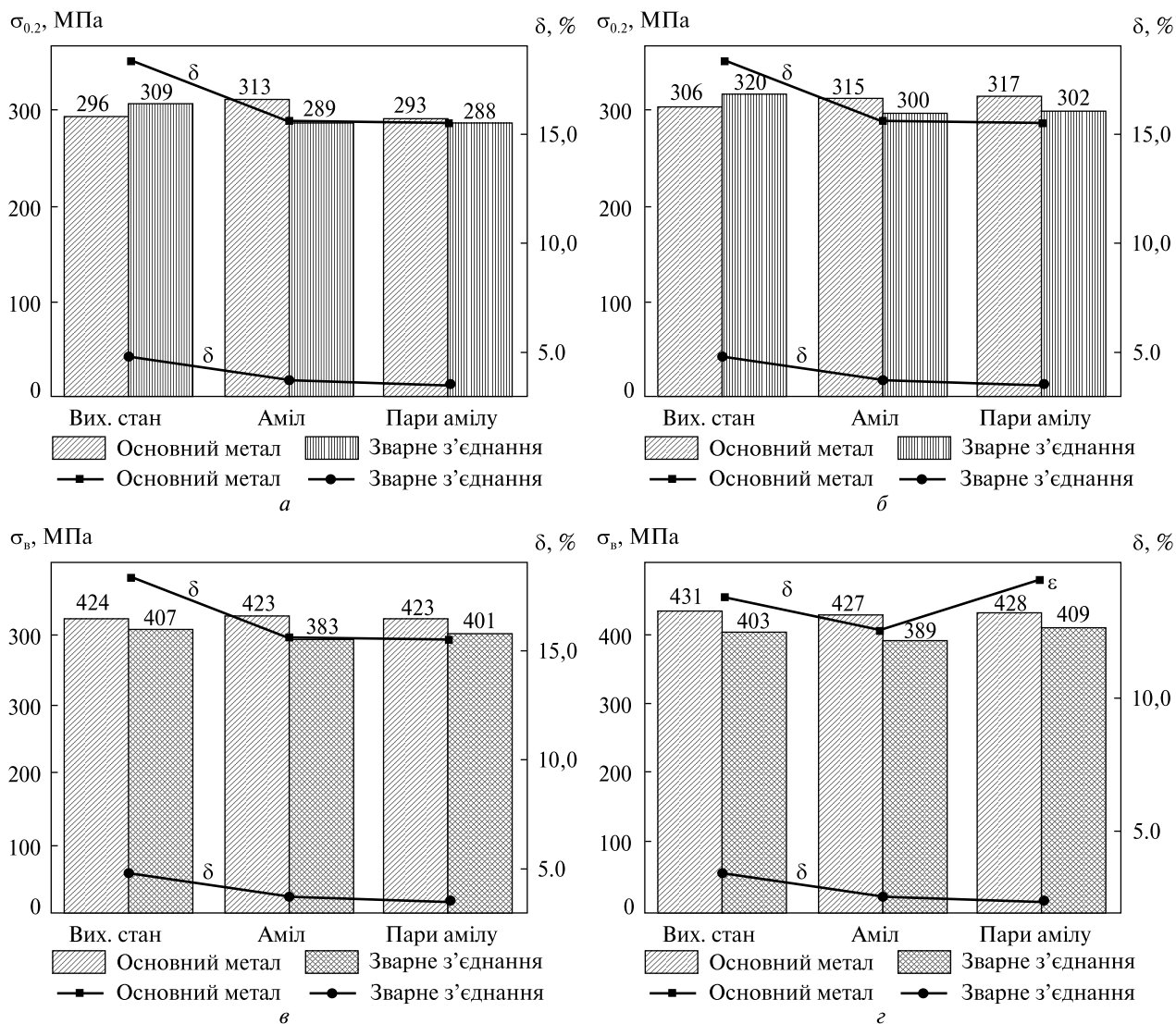


Рис. 5. Механічні властивості основного металу та зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 вздовж (а, в) та поперек (б, г) прокату до корозійних випробувань, після корозійних випробувань в амілі та його парах

Аналогічна закономірність спостерігалась для зразків зварних з'єднань, які були зварені поперек напрямку прокату: межа плинності контрольних зразків становила 309...331 МПа, що майже на 5 % вище, ніж для основного металу — 304...337 МПа (рис. 5, в), межа міцності — 392...414 МПа, що на 6 % менше від міцності основного металу (рис. 5, г). Відносне видовження поздовжніх зразків становило 4.9 %, поперечних — 3.6 %. Коефіцієнт міцності контрольних

зразків зварних з'єднань, зварених поперек напрямку прокату, дорівнював 0.94.

Після корозійних випробувань зразків з'єднань, зварених вздовж прокату, в амілі спостерігали зниження на 8 % межі плинності сплаву 2219-Т81 — до 284...297 МПа. Міцність з'єднань при цьому також зменшилась на 10 %, до 347...411 МПа (рис. 5, а, б). У зразках, зварених поперек напрямку прокату, показник межі плинності становив 275...321 МПа, що





нань після дії амілу становив 0.95 для поздовжніх зразків та 0.96 для поперечних.

Руйнування усіх досліджених зразків відбувалось в їхній робочій частині (рис. 6). Незалежно від напрямку прокату на зламах переважав в'язкий характер руйнування. Ці результати свідчать про те, що корозійно-агресивне середовище викликає повільне окрихчення металу.

## ВИСНОВКИ

1. Алюмінієвий сплав за вмістом основних легуючих елементів та домішок (за виключенням ванадію, вміст якого не визначали) відповідає вимогам AMS-QQ-A-250/30A.

2. Структура металу зварних швів — дендритна. Біля границі сплавлення дендрити мають стовбчасту будову та орієнтовані від лінії сплавлення до центра шва, в центрі шва — вздовж напрямку зварювання. У зоні термічного впливу зварних з'єднань спостерігається незначна рекристалізація зерен. Після корозійних випробувань в амілі та його парах мікроструктура поверхневих шарів основного металу, швів та зоні термічного впливу не змінюється, структурні параметри зварних з'єднань також лишаються незмінними та дорівнюють 60 мкм вздовж прокату та 25 мкм перпендикулярно до товщини листів для зразків в повздовжньому напрямку, 60 і 30 мкм — для зразків у поперечному напрямку.

3. Показники пластичності та міцності зразків зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, виконані однопрохідним зварюванням неплавким електродом, термооброблені до стану T62, становлять:

- у поздовжньому напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 301...317 МПа, основного металу — 295...297 МПа, межа міцності зварного з'єднання — 409...415 МПа, основного металу —

422...425 МПа, відносно подовження становить 4.0...5.8 % та 17.6...19.1 % відповідно;

- у поперечному напрямку: межа плинності зварного з'єднання — 309...331 МПа, основного металу — 304...317 МПа, границя міцності зварного з'єднання — 392...414 МПа, основного металу — 428...433 МПа, відносно подовження становить 2.0...3.3 % та 12.6...15.0 % відповідно. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому напрямку дорівнює 0.96, у поперечному — 0.94.

4. Після витримування в амілі та парах амілу показники міцності зразків основного металу та зварних з'єднань в обох напрямках майже не змінюються. Показники пластичності змінюються неоднозначно: межа плинності основного металу збільшується на 5...6 %, зварних з'єднань — знижується на 6...7 %, відносно подовження основного металу знижується на 5...16 %, зварних з'єднань — близько на 20 %. Після витримування в амілі коефіцієнт міцності зварних з'єднань у поздовжньому та поперечному напрямках однакові та дорівнюють 0.91, після витримування в парах амілу — 0.95 у поздовжньому напрямку і 0.96 поперечному.

5. Після дії амілу та його парів досліджені зварні з'єднання сплаву 2219 у стані T62 є стійкими проти корозійного розтріскування та міжкристалітної корозії. Тривкість проти розшарувальної корозії в амілі та його парах оцінена балом 2. Корозійну стійкість основного металу сплаву 2219 у стані T62 в амілі оцінено балом 2, що відповідає групі стійкості «підвищено стійкий»; у парах амілу — балом 3, що відповідає групі стійкості «стійкий».

*Роботу виконано за підтримки ДП «КБ Південне» (номер держреєстрації 0118U006291с) в 2018 р.*

ЛІТЕРАТУРА

1. AMS-QQ-A-250/30A. Технічні вимоги. Алюмінієвий сплав 2219. Лист і пластина.
2. ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Радиографический метод.
3. ГОСТ 9.904-82 Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию.
4. ГОСТ 9.021-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию.
5. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение.
6. ГОСТ 9.502-82 (СТ СЭВ 6194-88) Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний (с Изменениями № 1, 2).
7. Ищенко А. Я. *Алюминиевые высокопрочные сплавы для сварных конструкций. Прогресивні матеріали і технології*. Киев: Академперіодика, 2003.
8. Ищенко А. Я., Лабур Т. М. *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев: Наук. думка, 2013.
9. Мильман Ю. Е., Коржова Н. П., Сирко А. И. *Алюминий и его сплавы. Неорганические материаловедение. Металлы и технологии*. Киев: Наук. думка, 2008.
10. Хэтч Е. (Ред.). *Алюминий: Свойства и физическое материаловедение: Справочник*. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1989. 422 с.
11. Bai J. Y., Yang C. L., Lin S. B., Dong B. L., Fan C. L. Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2016. **86** (1). P. 479–485.
12. Chen S., Li F., Liu Q., Chen K., Huang, L. Effect of Post-aging Heat Treatment on Strength and Local Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained 2219 Al Alloy. *J. Materials Engineering and Performance*. 2020. **29** (5). P. 3420–3431.
13. Gupta R. K., Panda R., Mukhopadhyay A. K., Kumar V. A., Sankaravelayutham P., George K. M., Study of aluminum alloy AA2219 after heat treatment. *Metal Science and Heat Treatment*. 2015. **57** (5). P. 350–353.
14. Li H., Zou J., Yao J., Peng, H. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy. *J. Alloys and Compounds*. 2017. No. 727. P. 531–539.
15. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li, R., Zhou D. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. No. 723. P. 204–211.
16. Niu L. Q., Li X. Y., Zhang L., Liang X. B., Li M. Correlation between microstructure and mechanical properties of 2219-T8 aluminum alloy joints by VPTIG welding. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2017. **30** (5). P. 438–446.
17. Peng X. N., Qu W. Q., Zhang G. H. Influence of Welding Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219. *J. Aeronautical Materials*. 2009. **29** (2). P. 57–60
18. Rao P. S., Sivadasan K. G., Balasubramanian P. K. Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull. Materials Sci*. 1996. **19** (3). P. 549–557.
19. Rao S. K., Reddy G. M., Rao K. S., Kamaraj M., Rao K. P. Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds. *Materials characterization*. 2005. **55**(4-5). P. 345–354.
20. Baskutis S., Bendikiene R., Ciuplys A. Effect of weld parameters on mechanical properties and tensile behavior of tungsten inert gas welded AW6082-T6 aluminium alloy. *J. Mechanical Sci. & Technology*. 2019. **33** (2). P. 765–772.
21. Wan Z., Meng D., Zhao Y., Zhang D., Wang Q., Shan J., Song J., Wang G., Wu, A. Improvement on the tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint with weld geometry optimization. *J. Manufacturing Processes*. 2021. No. 67. P. 275–285.
22. Zhang D., Wang G., Wu A., Zhao Y., Li Q., Liu X., Meng D., Song J., Zhang Z. Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. *J. Alloys and Compounds*. 2019. No. 777. P. 1044–1053.
23. Zhang D., Wu A., Zhao Y., Shan J., Wan Z., Wang G., Song J., Zhang Z., Liu X. Effects of the Number of Welding Passes on Microstructure and Properties of 2219-C10S Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *J. Materials Engineering and Performance*. 2021. P. 1–10.
24. Zhang D. K., Wang G. Q., Wu A. P., Shan J. G., Zhao Y., Zhao T. Y., Meng D. Y., Song J. L., Zhang Z. P. Effects of Post-weld Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and the Role of Weld Reinforcement in 2219 Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2019. **32** (6). P. 684–694.
25. Zhang D., Li Q., Zhao Y., Liu X., Song J., Wang G., Wu A. Microstructure and mechanical properties of three-layer TIG-welded 2219 aluminum alloys with dissimilar heat treatments. *J. Materials Engineering and Performance*. 2018. **27** (6). P. 2938–2948.
26. Zhu Z. Y., Deng C. Y., Wang Y., Yang Z. W., Ding J. K., Wang D. P. Effect of post weld heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of AA2219 aluminum alloy joints welded by variable polarity tungsten inert gas welding. *Materials & Design*. 2015 (1980–2015). No. 65. P. 1075–1082.

## REFERENCES

1. John E. Hatch. (1989). Aluminum: Properties and Physical Metallurgy: A Handbook. Per. from English. Publisher: Metallurgy [in Russian].
2. AMS-QQ-A-250/30A. Technical requirements. Aluminum alloy 2219. Sheet and plate.
3. GOST 7512-82 Nondestructive testing. Welded joints. Radiography method, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
4. GOST 9.904-82 Unified system of corrosion and ageing protection. Alluminium alloys. Accelerated test method for exfoliating corrosion, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
5. GOST 9.021-74 Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium and aluminium alloys. Accelerated test methods for intercrystalline corrosion, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
6. GOST 1497-84 Metals. Methods of tension test, Moscow, Izd-vo standartov [in Russian].
7. GOST 9.502-82 Unified system of corrosion and ageing protection. Inhibitors of metals corrosion for aqueous systems. Methods of corrosion tests (with changes № 1, 2) Izd-vo standartov [in Russian].
8. Ishchenko A. Ya. (2003). *Aluminum high-strength alloys for weld structures. Progressive materials and technologies*. Kiev: Academic periodica.
9. Ishchenko A. Ya., Labur T. M. (2013). *Welding of modern structures from aluminum alloys*. Kiev: Nauk. dumka.
10. Milman Yu. E., Korzhova N. P., Sirko A. I. (2008). *Aluminum and its alloys. Inorganic materials science. Metals and technologies*. Kiev: Nauk. dumka.
11. Bai J. Y., Yang C. L., Lin S. B., Dong B. L., Fan C. L. (2016). Mechanical properties of 2219-Al components produced by additive manufacturing with TIG. *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, **86** (1), 479–485.
12. Chen S., Li F., Liu Q., Chen K., Huang, L. (2020). Effect of Post-aging Heat Treatment on Strength and Local Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained 2219 Al Alloy. *J. Materials Engineering and Performance*, **29** (5), 3420–3431.
13. Gupta R. K., Panda R., Mukhopadhyay A. K., Kumar V. A., Sankaravelayutham P., George K. M. (2015). Study of aluminum alloy AA2219 after heat treatment. *Metal Sci. and Heat Treatment*, **57** (5), 350–353.
14. Li H., Zou J., Yao J., Peng H. (2017). The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy. *J. Alloys and Compounds*, No. 727, 531–539.
15. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li R., Zhou D. (2018). Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Sci. and Engineering: A*, **723**, 204–211.
16. Niu L.Q., Li, X.Y., Zhang L., Liang X.B., Li M. (2017). Correlation between microstructure and mechanical properties of 2219-T8 aluminum alloy joints by VPTIG welding. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **30** (5), 438–446.
17. Peng X. N., Qu W. Q., Zhang G. H. (2009). Influence of Welding Processes on Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2219. *J. Aeronautical Materials*, **29** (2), 57–60.
18. Rao P. S., Sivadasan K. G., Balasubramanian P. K. (1996). Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull. Materials Sci.*, **19** (3), 549–557.
19. Rao S. K., Reddy G. M., Rao K. S., Kamaraj M., Rao K. P. (2005). Reasons for superior mechanical and corrosion properties of 2219 aluminum alloy electron beam welds. *Materials characterization*, **55**(4-5), 345–354.
20. Baskutis S., Bendikiene R., Ciuplys A. (2019). Effect of weld parameters on mechanical properties and tensile behavior of tungsten inert gas welded AW6082-T6 aluminium alloy. *J. Mechanical Sci. and Technol.*, **33** (2), 765–772.
21. Wan Z., Meng D., Zhao Y., Zhang D., Wang Q., Shan J., Song J., Wang G., Wu A. (2021). Improvement on the tensile properties of 2219-T8 aluminum alloy TIG welding joint with weld geometry optimization. *J. Manufacturing Processes*, **67**, 275–285.
22. Zhang D., Wang G., Wu A., Zhao Y., Li Q., Liu X., Meng D., Song J., Zhang Z. (2019). Study on the inconsistency in mechanical properties of 2219 aluminium alloy TIG-welded joints. *J. Alloys and Compounds*, **777**, 1044–1053.
23. Zhang D., Wu A., Zhao Y., Shan J., Wan Z., Wang G., Song J., Zhang Z., Liu X. (2021) Effects of the Number of Welding Passes on Microstructure and Properties of 2219-C10S Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *J. Materials Engineering and Performance*, 1–10.
24. Zhang D. K., Wang G. Q., Wu A. P., Shan J. G., Zhao Y., Zhao T. Y., Meng D. Y., Song J. L., Zhang Z. P. (2019). Effects of Post-weld Heat Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and the Role of Weld Reinforcement in 2219 Aluminum Alloy TIG-Welded Joints. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **32** (6), 684–694.
25. Zhang D., Li Q., Zhao Y., Liu X., Song J., Wang G., Wu A. (2018). Microstructure and mechanical properties of three-layer TIG-welded 2219 aluminum alloys with dissimilar heat treatments. *J. Materials Engineering and Performance*, **27** (6), 2938–2948.
26. Zhu Z. Y., Deng C. Y., Wang Y., Yang Z. W., Ding J. K., Wang D. P. (2015 (1980-2015)). Effect of post weld heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of AA2219 aluminum alloy joints welded by variable polarity tungsten inert gas welding. *Materials & Design*, No. 65, 1075–1082.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2021  
Після доопрацювання 20.04.2022  
Прийнято до друку 20.04.2022

Received 24.09.2021  
Revised 20.04.2022  
Accepted 20.04.2022

L. I. Nyrkova<sup>1</sup>, Head of Department, Dr. Sci. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

E-mail: lnyrkova@gmail.com, Nyrkova@paton.kiev.ua

T. M. Labur<sup>1</sup>, Chief Researcher, Associate Senior Researcher, Dr. Sci. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4064-2644>

E-mail: labur@paton.kiev.ua

E. I. Shevtsov<sup>2</sup>, Deputy General Designer – Chief Designer

E-mail: info@yuzhnoye.com

O. P. Nazarenko<sup>2</sup>, Head of Department

A. V. Dorofeev<sup>2</sup>, Team Leader

S. O. Osadchuk<sup>1</sup>, Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-9559-0151>

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

M. R. Yavorska<sup>1</sup>, Leading Engineer,

ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2016-6289>

A. G. Poklyatsky<sup>1</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4101-2206>

E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua

V. E. Fedorchuk<sup>1</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9929-3231>

E-mail: fedorchuk@paton.kiev.ua

<sup>1</sup> E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine

11, K. Malevicha Str., Kyiv, 03150 Ukraine

<sup>2</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Krryvorizka Str, Dnipro, 49008 Ukraine

#### COMPLEX OF PROPERTIES OF 2219 ALLOY WELDED JOINT IN T62 STATE UNDER CONDITIONS MODELING OPERATING CONDITIONS

A complex of properties of aluminium alloy 2219 welded joint, made by single-pass welding with a non-fusible electrode along and across the rolled product, and heat-treated to the state T62, in liquid amyl and its vapors at a temperature of 50 °C for 45 days was investigated. Characteristics of plasticity and strength of 2219 alloy welded joints are as follows: in the longitudinal (D) direction – yield strength of the welded joint is (301–317) MPa, of the base metal (295–297) MPa, strength limit of the welded joint (409–415) MPa, of the base metal (422–425) MPa, elongation is (4.0–5.8)% and (17.6–19.1)%, respectively; in the transverse (P) direction – the yield strength of the welded joint is (309–331) MPa, of the base metal (304–307) MPa, the yield strength of the welded joint (392–414) MPa, of the base metal (428–433) MPa, elongation is (2.1–3.3)% and (12.6–15.0)%, respectively. The strength coefficient of welded joints in the longitudinal direction is 0.96, in the transverse – 0.94.

Welded joints in the above environment are resistant to corrosion cracking and intergranular corrosion, resistance against exfoliating corrosion is evaluated by grade 2. Resistance of 2219 alloy in T62 state in amyl corresponds to the resistance group «stable», in amyl vapors – the group “highly resistant”. After aging in amyl and amyl vapors, the strength grades of the base metal samples and welded joints in both directions are almost unchanged, the plasticity parameters change ambiguously: the yield strength of the base metal increases by ~ (5–6)%, of welded joints decreases by ~ (6–7)%, the relative elongation of the base metal is reduced by ~ (5–16)%, of welded joints by about ~ 20 %. Independently of the direction of welding relative to metal's rolling, samples' fractures are mostly viscous. After the exposing in amyl, the coefficient of the strength of welded joints in the longitudinal and transverse directions is the same and equal to 0.91, after the influence of amyl vapors, it is 0.95 in the longitudinal direction and 0.96 in the transverse direction.

**Keywords:** aluminum alloy 2219, welded joints, heat treatment, corrosion resistance, mechanical properties, microstructure, mechanical tensile fracture.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.030>  
УДК 004.62, 004.67

М. О. ЄМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, наук. співроб.  
E-mail: primus.spatium@gmail.com  
А. Ю. ШЕЛЕСТОВ<sup>2</sup>, проф.  
Г. О. ЯЙЛИМОВА<sup>2</sup>, аспірантка  
Л. Л. ШУМІЛО<sup>1</sup>, молод. наук. співроб.

<sup>1</sup>Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
та Державного космічного агентства України  
Проспект Академіка Глушкова 40, Київ, Україна, 03187

<sup>2</sup>Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

## ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ПЛОЩІ ОСНОВНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

У даній роботі проведено статистичний аналіз часового ряду площ мажоритарних культур за 20 років (з 1998 по 2020 рр.), а також проаналізовано вплив агрокліматичних зон на площі вирощування основних культур. Зміни клімату, що найгостріше відчуються у південних регіонах України, підвищують виробничий ризик в аграрній сфері через зміни температури, режиму опадів та інших екстремальних погодних явищ. Історичні кліматичні дані свідчать про підвищення температури на території України, а прогнози клімату допускають подальше потепління, особливо на півдні України. На основі супутникових та статистичних даних досліджено зміни земної поверхні для визначених областей, для яких характерні найбільші зміни площ посівів основних типів сільськогосподарських культур. Для аналізу динаміки посівних площ у кліматичних зонах використовуються національні статистичні дані за 1998—2019 рр., карти класифікації земельного покриву за 2016—2020 рр., дані про кліматичні зони по території України за 2000 та 2020 рр., а також контури адміністративних одиниць рівня NUTS2. Оскільки для багатьох районів немає статистичних даних за 2019—2020 рр. у зв'язку із реформуванням територіальних меж, замість статистичних даних використано посівні площі, отримані на основі супутникової інформації. Як додаткова та альтернативна інформація для аналізу посівних площ були використані карти класифікації посівів за 2016—2020 рр., отримані за власними технологіями глибинного навчання фахівцями Інституту космічних досліджень НАНУ та ДКАУ. Карти класифікації отримано з використанням відкритих супутникових даних програми Copernicus: SAR «Sentinel-1» та «Sentinel-2» з просторовим розрізненням 10 м. Порівняння статистичних даних зі значеннями площ посівів, отриманими за супутниковими даними, здійснюється з використанням метрики статистичного аналізу коефіцієнта кореляції ( $r$ ). Для оцінки точності також використовується коефіцієнт детермінації  $R^2$  між статистичною площею основних культур і площею за супутниковими даними.

**Ключові слова:** зміни клімату, супутникові дані, глибинне навчання, карти класифікації, «Sentinel-1», «Sentinel-2».

### ВСТУП

Сільське господарство є найважливішим сектором економіки України, і в період з 2005 по 2012

рік його внесок у валовий внутрішній продукт країни становив у середньому 10 % [16].

Сільськогосподарське виробництво багато в чому залежить від погодних умов і, як наслідок,

Цитування: Ємельянов М. О., Шелестов А. Ю., Яйлимова Г. О., Шуміло Л. Л. Вплив зміни клімату на площі основних сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 30—38. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.030>



Рис. 1. Екологічні зони України

від довгострокових тенденцій і змін кліматичних умов [9]. Висока мінливість погоди сприяє суттєвим коливанням врожайності, що спостерігається в Україні, а зміни клімату підвищують виробничий ризик та загрозу майбутньому рослинництву через зміни температури, режиму та об'єму опадів і все частішим виникненням екстремальних погодних явищ. Історичні кліматичні дані свідчать про підвищення температури на території України, а прогнози клімату допускають подальше потепління, особливо на півдні України. Зміни клімату по-різному впливають на врожайність через кількість опадів і екстремальні температури [11]. Наприклад, аномальні явища, такі як від'ємна температура восени або сильна спека навесні, можуть призвести до значних втрат врожаю пшениці [14]. Також відомо, що в усьому світі екстремальна спека призводить до значного зниження врожайності зернових [7], і є переконливі докази того, що частота екстремальних явищ найближчим часом буде збільшуватися у багатьох регіонах світу [10].

Проте українське сільське господарство може отримати і позитивний вплив змін клімату в де-

яких регіонах через підвищення зимових температур і збільшення зимових опадів, більш тривалого безморозного сезону і вищої концентрації  $\text{CO}_2$  [8]. Відповідно орні землі можуть розширюватися, особливо на півночі України, але такі прогнози на даний момент є недостатньо визначеними.

З огляду на вищенаведене, основною метою даного дослідження є оцінка впливу зміни погодних параметрів на врожайність та зміни загальної площі кожної із мажоритарних сільськогосподарських культур на території України.

### ЕКОЛОГІЧНІ ЗОНИ

В Україні континентальний клімат супроводжується жарким літом і холодною зимою. Кількість опадів поступово зменшується, а температура підвищується з півночі на південь. На близько 48 % території країни містяться високородючі чорноземи, і переважно у південних регіонах [2].

Кліматичні і ґрунтові умови дозволяють розділити Україну на три основні кліматичні зони, які характеризуються різними екологічними

умовами, важливими для сільськогосподарського виробництва [3]: змішаний ліс, лісостеп і степ (рис. 1). Дві інші зони в Україні, а саме Карпати на заході і Кримські гори на півдні в даному дослідженні не розглядалися з огляду на дуже низьку кількість посівних площ.

### КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

У порівнянні з діючою кліматичною нормою щороку середньорічна температура тримається на рівні 1–2° вище норми. За даними НАН України за останні десятиліття відбулося фактичне зміщення меж природно-кліматичних зон країни на 100...150 км на північ. Умови вегетації в традиційній підзоні північного степу (Дніпропетровська, Кіровоградська області та ін.) за останні роки вже де-факто повинні бути віднесені до підзони південного степу [1].

За кліматичним режимом степова частина України поступово наближається до сухих субтропіків, до якої, наприклад, належить територія Греції. Якщо теперішні тенденції зміни клімату збережуться в найближчі 20 років, це стане реальною небезпекою фактичної втрати для інтенсивного землеробства не тільки зони степу, але й понад половини площ орних земель України. За даними досліджень Китайської академії аграрних наук (Chinese Academy of Agricultural Sciences — CAAS) [15] спостерігається негативний тренд між врожайністю основних культур та середніми максимальними та мінімальними температурами за вегетаційний період. Це може призводити до необхідності зрошення навіть таких культур, які раніше цього не потребували, наприклад пшениці, що призведе до значного росту фінансових витрат. Саме тому аграрії змінюють спектр культур на такі, що мають більшу економічну доцільність.

В той же час зміни клімату та зміщення кліматичних зон можуть мати для аграрного сектору також і позитивні наслідки. Саме тому в останні роки в Україні створюються умови для вирощування двох врожаїв за один сезон і не тільки у південних, а й у північних областях. Такі результати на основі аналізу супутникової інформації отримали фахівці Інституту космічних досліджень НАНУ-ДКАУ [5].

Супутникові дані дають можливість відслідковувати зміни земної поверхні та робити певні аналітичні висновки на основі результатів аналізу. На основі супутникових даних можна отримати карти класифікації сільськогосподарських культур і аналізувати, як вони змінюються в різних кліматичних зонах України. Такі зміни насправді відбуваються, і у ході досліджень було визначено області, для яких характерні найбільші зміни площ посівів для основних типів культур. Цей важливий економічний показник можна враховувати в державному управлінні та статистиці.

### ВХІДНІ ДАНІ

Для аналізу динаміки посівних площ відносно кліматичних зон використовувалися національні статистичні дані за 1998—2019 рр., карти класифікації земного покриву за 2016—2020 рр., дані про кліматичні зони по території України за 2000 та 2020 рр., а також контури адміністративних одиниць рівня NUTS2 (рівень областей).

На рис. 2 зображено зміщення кліматичних зон на території України.

Офіційні статистичні дані використовувалися на рівні районів для основних мажоритарних культур України (пшениця, соняшник та кукурудза). Для 2019—2020 рр. статистичних даних для багатьох районів немає у зв'язку із реформуванням територіальних меж. Тому замість статистичних даних використано посівні площі, отримані за супутниковою інформацією.

Як додаткову та альтернативну інформацію для аналізу посівних площ використано карти класифікації посівів за 2016—2020 рр., отримані за власними технологіями глибинного навчання фахівцями Інституту космічних досліджень НАНУ та ДКАУ [4]. Використані карти класифікації отримано з використанням відкритих супутникових даних програми Copernicus: SAR «Sentinel-1» та «Sentinel-2» з просторовим розрізненням 10 м. Карти отримано у межах проєктів Світового Банку та “Support to Agriculture and Food Policy Implementation” (SAFPI) [4, 6], що фінансувався Європейським союзом. Для перевірки достовірності карт класифікації для оцінки площ проведено їхнє порівняння зі ста-



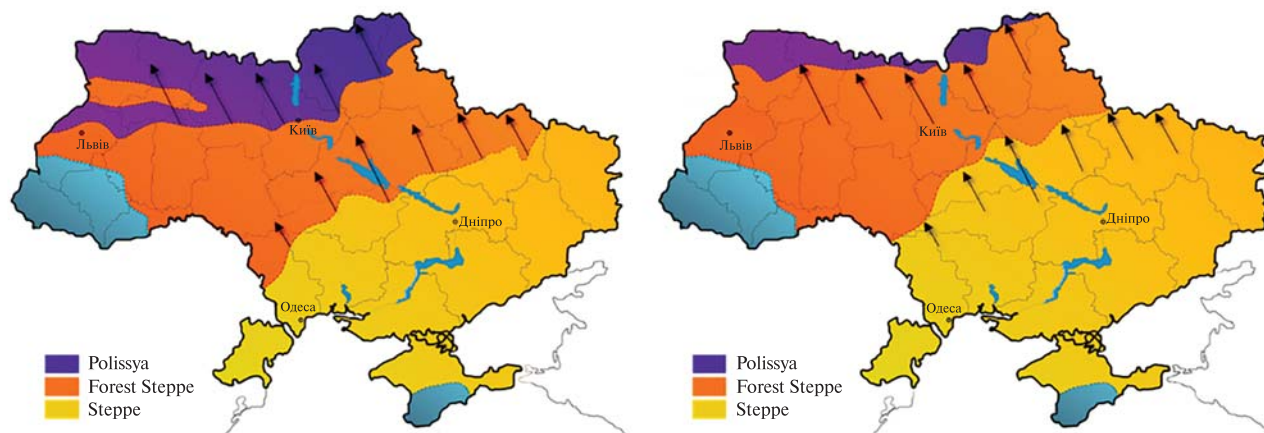
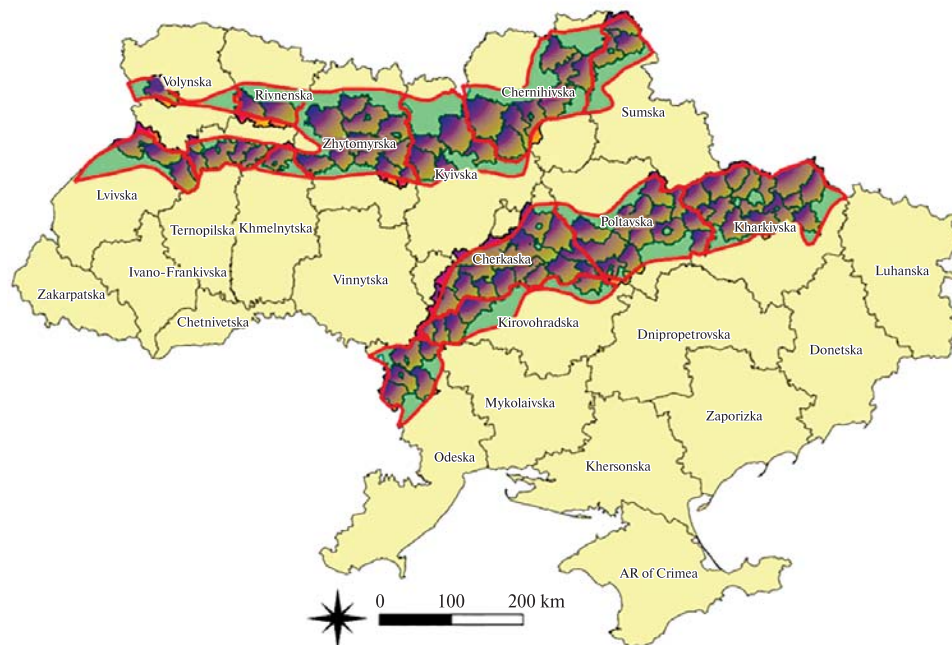


Рис. 2. Зміни меж кліматичних зон України

Таблиця 1. Регіони, на які впливають кліматичні зміни

Область	Райони
<i>Територія А</i>	
Волинська	Турійський
Житомирська	Баранівський, Брусилівський, Хорошівський, Ємільчинський, Коростенський, Коростишівський, Лугинський, Малинський, Радомишльський, Пулинський, Черняхівський
Київська	Бородянський, Броварський, Вишгородський, Києво-Святошинський, Макарівський
Львівська	Бродівський, Радехівський, Сокальський
Рівне	Демидівський, Дубенський, Здолбунівський, Острозький, Радивилівський
Сумська	Середино-Будський, Шосткинський, Ямпільський
Хмельницька	Славутський
Чернігів	Бобровицький, Борзнянський, Козелецький, Коропський, Корюківський, Ніжинський, Носівський, Сосницький
<i>Територія В</i>	
Кіровоградська	Гайворонський, Голованівський, Новоархангельський, Світловодський, Ульяновський
Одеська	Ананівський, Балтський, Подільський, Окнянський, Савранський
Полтавська	Великобагачанський, Глобинський, Диканський, Зіньківський, Карлівський, Козельщинський, Котелевський, Кременчуцький, Полтавський, Решетилівський, Семенівський, Чутівський, Шишацький
Харківська	Богодухівський, Вальківський, Великобурлуцький, Вовчанський, Дергачівський, Зміївський, Золочівський, Коломацький, Краснокутський, Нововодолазький, Печенізький, Харківський, Чугуївський, Шевченківський
Черкаська	Городищенський, Звенигородський, Золотоніський, Кам'янський, Катеринопільський, Корсунь-Шевченківський, Лисянський, Маньківський, Смілянський, Тальнівський, Уманський, Черкаський, Чигиринський, Чернобаївський, Шполянський



**Рис. 3.** Території на перетині кліматичних зон, які змінилися, та ділянки, які там розташовані

тистичними даними на рівні районів України за 2016—2020 рр.

Для аналізу змін посівних площ мажоритарних культур виділено території, що перебували на перетині кліматичних зон, які змінилися. На рис. 3 червоними лініями зображено ідентифіковані зони переходу кліматичних зон. У межах цих територій було обрано райони, 80 % від площі яких потрапили у межі переходу кліматичної зони. Верхня частина (А) — це зміна полісся на лісостеп, нижня частина (В) — зміна лісостепу на степ. У табл. 1 представлено площі окремо для території А та території В.

Як вже зазначалося вище, статистичні дані містять значні прогалини у 2019 та 2020 рр., тому для повноцінного аналізу часового ряду даних з 2000 по 2020 рр. використано посівні площі по мажоритарних культурах, отримані за супутниковими даними на основі методів глибинного навчання. Площі, отримані за картами класифікації типів культур за 2016—2018 рр., порівнюються зі статистичними даними.

Після порівняння площ мажоритарних культур за картою класифікації зі статистичними

даними та перевірки їхньої достовірності було проведено аналіз статистичних даних із доповненою інформацією за супутниковими даними за 2016—2020 рр.

### ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Порівняння статистичних даних із отриманими площами посівів за супутниковими даними здійснювалось з використанням метрики статистичного аналізу коефіцієнта кореляції ( $r$ )

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - s)(p_i - p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p)^2}},$$

де  $s_i$  — площа сільськогосподарських культур за супутниковими даними, а  $p_i$  — площа за статистичними даними,  $s$  і  $p$  — відповідні середні арифметичні значення,  $n$  — кількість регіонів.

Для оцінки точності також було використано коефіцієнт детермінації  $R^2$  між статистичною площею основних культур і площею за супутниковими даними:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \hat{s}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - p)^2}.$$

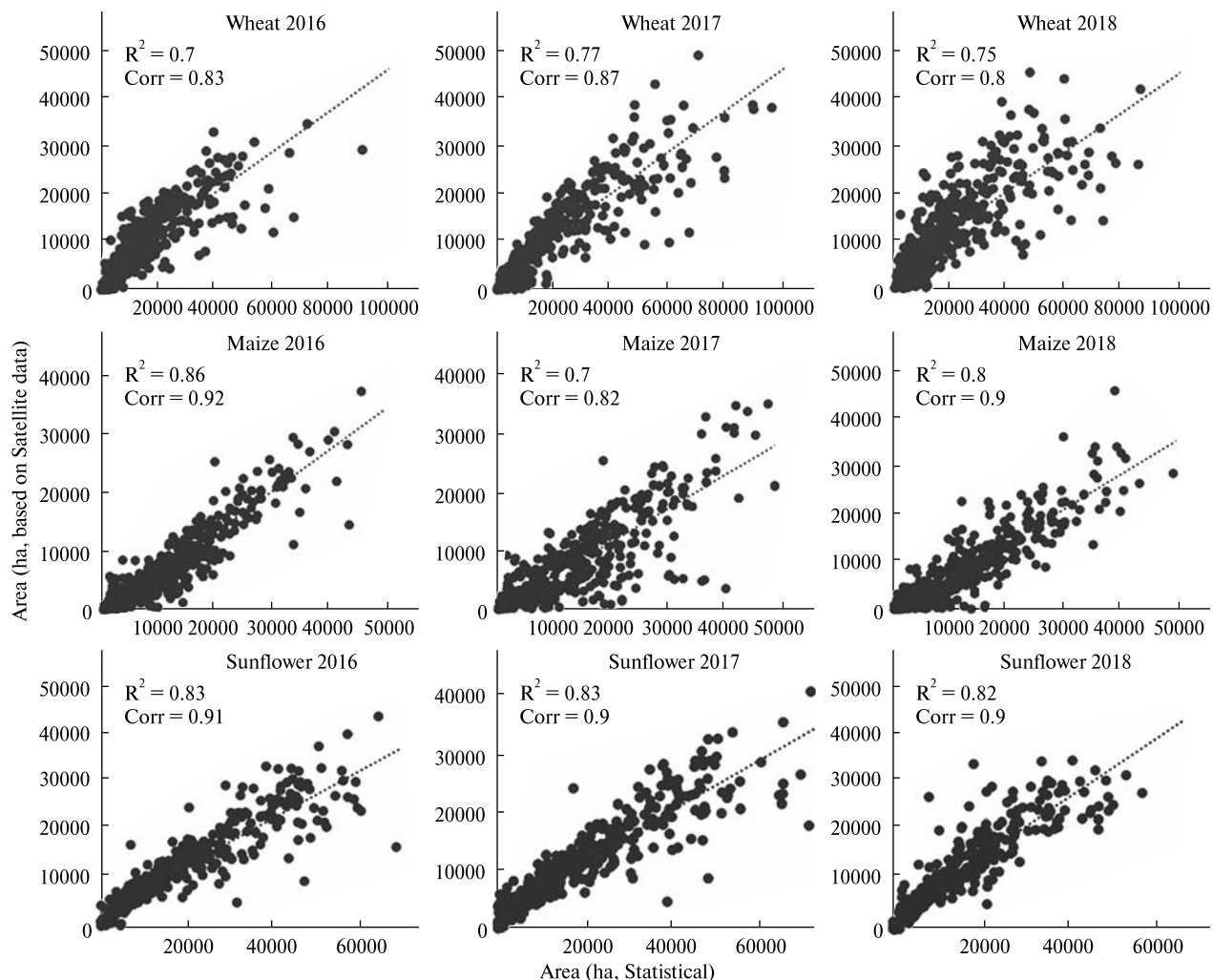


Рис. 4. Порівняння площ за статистичними та супутниковими даними

Таблиця 2. Площі, зайняті кукурудзою та соняшником по роках у зоні Полісся

Культура	1998 р.	1999 р.	2000 р.	2001 р.	...	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Кукурудза	9194	8566	14104	21820	...	258902.1	271518.2	316996.1	108037.5
Соняшник	3773	5913	7980	3523	...	185612.6	188358.1	220390.5	130736

На рис. 4 зображено результати порівняння площ основних сільськогосподарських культур за статистичними та супутниковими даними. Видно, що значення коефіцієнта кореляції та регресійного показника перебувають у межах  $r = 0.8...0.9$  та  $R^2 = 0.7...0.8$ . Аналізуючи ці показники, можна зробити висновок, що карти класифі-

кації на рівні країни є достовірною інформацією та можуть бути використані для державних органів влади як додаткова інформація до статистичних даних щодо посівних площ.

Аналізуючи площі, зайняті основними культурами на територіях А та В, можна зробити кілька висновків. Перший з них проілюстровано

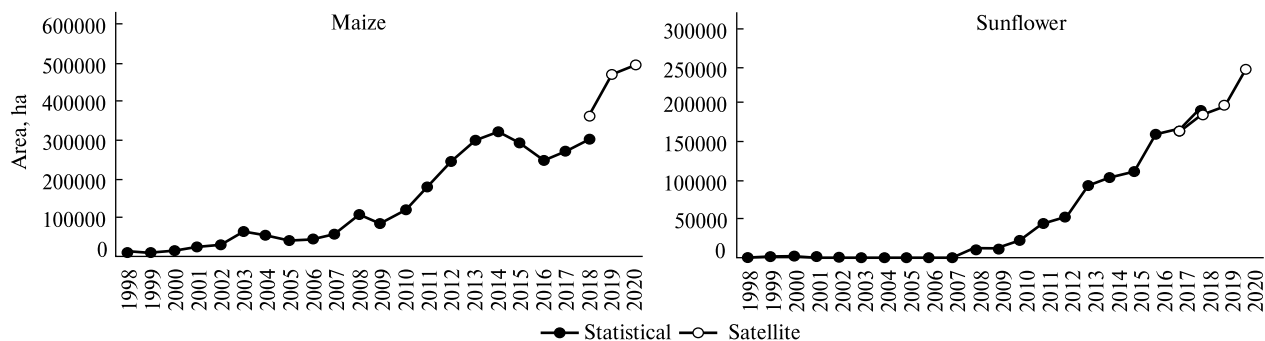


Рис. 5. Зростання посівних площу кукурудзи та соняшнику на території А з 1998 по 2020 р.

на рис. 4. Як видно з табл. 2, починаючи з 1998 р. у зоні полісся значно зросли посівні площі кукурудзи та соняшнику.

Раніше агрокліматичні умови не дозволяли використовувати ці культури у зоні полісся, оскільки вони не встигали дозріти за недостатньої температури. Проте у зв'язку з кліматичними змінами це стало можливим, а в деяких районах Львівської області на даний момент можна отримати два урожаї за сезон з одного поля. Таке дослідження також провадилось у межах проекту Світового Банку. У процесі досліджень було виявлено близько 4 тис. га посівної площі, на яких урожай було зібрано двічі за сезон.

Проте в умовах змін клімату трохи краще себе почуватимуть озимі культури. Позитивним фактором для озимих зернових культур на тлі загального підвищення температури повітря, яке відзначають в останні роки, є порівняно теплі зими, які дозволяють рослинам успішно перезимувати і навіть пройти певний етап у своєму розвитку. На рис. 5 зображено площі на досліджуваних територіях для пшениці за 1998—2020 рр., з чого можна зробити висновок, що для пшени-

ці немає чіткої тенденції зміни площ внаслідок змін клімату.

### ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що у зоні полісся посівні площі кукурудзи збільшились на 98843 га, а соняшнику — на 126963 га, тоді як для степної зони ці значення дорівнюють 361551 і 473044 га для кукурудзи та соняшнику відповідно.

За проведеними дослідженнями та за результатами порівнянь статистичних даних з даними про посівні площі, які отримані на основі карт класифікації за супутниковою інформацією, можна дійти висновку, що супутникові дані можуть ефективно використовуватися спільно з іншими джерелами даних, зокрема статистичними.

*Дослідження виконувались в межах проекту Національного Фонду Досліджень України 2020.01/0273 «Інтелектуальні моделі і методи визначення індикаторів деградації земель на основі супутникових даних».*

## REFERENCES

1. Abstracts of the II International scientific-practical conference «Climate change and agriculture. Challenges for agricultural science and education», April 10–12, 2019. SI NMC «Agroosvita», Kyiv — Mykolaiv — Kherson, 2019. 495 p.
2. FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, and JRC (2009). Harmonized World Soil Database (version 1.1). Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
3. Keyzer M. A., Merbis M. D., Witt R., Heyets V., Borodina O., Prokopa I. (2012). *Farming and rural development in Ukraine: making dualisation work*. Farming and rural development in Ukraine: making dualisation work. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre.
4. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Skakun S. (2018). Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European J. Remote Sensing*, **51**, 627–636. DOI: 10.1080/22797254.2018.1454265.
5. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B., Yailymova H., Lavreniuk M., Shumilo L., Bilokonska Y. (2020). Crop monitoring technology based on time series of satellite imagery. *IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 346–350. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125031.
6. Kussul N. (2020). *Satellite Agricultural Monitoring in Ukraine at Country Level: World Bank Project*. IGARSS 2020–2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE., 1050–1053. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324573
7. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, **529**(7584), 84–87.
8. Lioubimseva E., Beurs K. M., Henebry G. M. (2013). *Grain Production Trends in Russia, Ukraine, and Kazakhstan in the Context of the Global Climate Variability and Change*. Grain Production Trends in Russia, Ukraine, and Kazakhstan in the Context of the Global Climate Variability and Change / Eds T. Younos, C. A. Grady. Berlin: Springer, 121–141.
9. Nelson G. C., Valin H., Sands R. D., Havlík P., Ahammad H., Deryng D., Elliott J., Fujimori S., Hasegawa T., Heyhoe E., Kyle P., Von Lampe M., Lotze-Campen H., Mason d’Croz D., van Meijl H., van der Mensbrugge D., Müller C., Popp A., Robertson R., Robinson S., Schmid E., Schmitz C., Tabau A., Willenbockel D. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**(9), 3274–9.
10. Porter J. R., Xie L., Challinor A. J., Cochrane K., Howden S. M., Iqbal M. M., Lobell D. B., Travasso M. I. (2014). *Food security and food production systems*. Food security and food production systems / Eds C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D.
11. Schlenker W., Roberts M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(37), 15594–98.
12. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Shumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Yailymova H. (2020). Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *IEEE Transactions on Big Data*, **6**(3), 572–582. DOI: 10.1109/TBDATA.2019.2940237.
13. State Statistics Service of Ukraine. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Last accessed 10.05.2021).
14. Tack J., Barkley A., Nalley L. L. (2015). Effect of warming temperatures on US wheat yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**(22), 6931–6936.
15. Tao F., Yokozawa M., Xu Y., Hayashi Y., Zhang Z. (2006). Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agricultural and forest meteorology*, **138**(1–4), 82–92. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.03.014.
16. World Bank (2016). *World Development Indicators 2016*. Washington, D.C.: The World Bank.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2021

Після доопрацювання 20.04.2022

Прийнято до друку 20.04.2022

Received 07.10.2021

Revised 20.04.2022

Accepted 20.04.2022

*M. O. Yemelyanov*<sup>1</sup>, Researcher

E-mail: primus.spatium@gmail.com

*A. Yu. Shelestov*<sup>2</sup>, Professor

*H. O. Yailyмова*<sup>2</sup>, Postgraduate Student

*L. L. Shumilo*<sup>1</sup>, Junior Researcher

<sup>1</sup> Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine  
40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37, Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

## IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE AREA OF MAJOR CROPS

In this work, a statistical analysis of the time series of areas of majoritarian crops for 20 years (from 1998 to 2020) is carried out, and the influence of agro-climatic zones on the area of cultivation of major crops is analyzed. Climate change is acutely felt in the southern regions of Ukraine, increasing the production risk in the agricultural sector through changes in temperature, precipitation, and other extreme weather events. Historical climatic data indicate an increase in temperature on the territory of Ukraine, and climate forecasts suggest further warming, especially in the south of Ukraine.

Using satellite and statistical data, changes in the earth's surface are investigated for certain areas, which are characterized by the greatest changes in crop areas for the main types of crops. To analyze the dynamics of cultivated areas in relation to climatic zones, we used national statistical data for 1998–2019, maps of the classification of land cover from 2016–2020, data on climatic zones on the territory of Ukraine for 2000 and 2020, as well as the contours of administrative units of the NUTS2 level. Since statistical data for many districts are not available for the period 2019–2020 due to the reform of territorial boundaries, we used instead cultivated areas obtained from open satellite records. As additional and alternative information for the analysis of acreage, crop classification maps for 2016–2020 were used, obtained by specialists of the Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine from their own in-depth training technologies.

We used classification maps obtained using open satellite data of the Copernicus program: SAR Sentinel-1 and Sentinel-2 with a spatial resolution of 10 m. A comparison of statistical data and crop areas obtained from satellite data was carried out by applying the metric of statistical analysis of the correlation coefficient ( $r$ ). To assess the accuracy, the coefficient of determination  $R^2$  between the statistical area of the main crops and the area according to satellite data was also applied.

**Keywords:** climate change, satellite data, deep learning, classification maps, Sentinel-1, Sentinel-2.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.039>

**O. BEN BAHRI**

Department of Science and Technology, College of Ranyah, Taif University  
P.O. Box 11099, Taif 21944, Saudi Arabia

## IMPACT OF DIDACTIC SATELLITE IN SPACE MATURITY IMPROVEMENT: A REVIEW PAPER

*Space technology is becoming increasingly important in modern society. It participates in the construction of the future and the welfare of humanity through many applications in daily life. These factors lead to the need for training, research, and development in this area of space exploration. This paper reviews the use of small satellites to acquire basic knowledge of the space sector. Further development of this knowledge leads to the creation of space missions, which, in turn, ensure the progress of the space technology readiness level (TRL), defined by the international measurement scale. It is able to estimate technological maturity. The review concludes that the use of low-cost or didactic satellites could contribute to space mission development and demonstration. We reckon that embedded components with functions similar to smartphones can be used to achieve this goal. Two types of embedded components are discussed to demonstrate their efficacy in space engineering.*

**Keywords:** Cubesat, data analysis, didactic, satellite, space engineering, TRL.

### 1. INTRODUCTION

Space technology is beneficial in many areas, such as climate and meteorological monitoring, access to health care and education, water management, transport efficiency and agriculture, peacekeeping, security and humanitarian aid. The list of space applications impacting life on Earth is virtually endless, and many more contributions are currently under development or studied.

Unfortunately, the space sector continues to be affordable only to large national projects or extremely wealthy organizations. In this context, small organizations and emerging countries are adopting small satellites as their means of space exploration [1–5]. These satellites are often dedicated to scientific or amateur operations. This leads to a higher technology readiness level (TRL) to develop missions in the space domain. It is obvious that this work made it possible to advance technological maturity on satel-

lite missions based on different platforms. This is an excellent educational idea to validate possible missions but also breaks new issues related to reliability, the life of a mission, and its reconfigurability. Despite the limitations present in the didactic project, it offers a reliable platform to access the space domain promoting TRL.

Technology Readiness Levels (TRLs) are a systematic metric that provides an objective measure to communicate the maturity of a particular technology among program executives, system developers and technology researchers, and individuals from different organizations. Generally, it aimed to monitor the maturation of technology. In addition, the use of TRLs can provide a needed foundation for developing and communicating insight into the risks involved in advancing a new system and its constituent new technology components [6].

Indeed, TRL is originally developed by NASA, and therefore, it is widely used as a reference in aero-

Цитування: Ben Bahri O. Impact of didactic satellite in space maturity improvement: a review paper. *Space Science and Technology*. 2022. 28, № 2 (135). С. 39–47. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.039>

nautical and aerospace projects. NASA, therefore, reached the top level of TRL, which opens the door for defining a higher TRL category. S. Jeremy considers the need of defining the TRL 10 as a new category [7].

In fact, developers need big budgets to reach a progressive TRL, mostly in the space domain. This creates a gap for emerging countries and small organizations that lead to the birth of a new class of satellites around didactic projects. This innovation provides a reliable platform to improve the maturity of the space sector. Thus, this paper reviews the impact of didactic satellites to develop TRL and therefore encourages universities and emerging countries to explore the space domain and benefit from its wide applications.

**2. TECHNOLOGY READINESS LEVEL**

Science, technology, and space data can directly or indirectly contribute to the achievement of all the sustainable development goals. Space science encompasses those scientific disciplines focused on the exploration of space and the study of natural phenomena and physical bodies in space, including astronomy, aerospace engineering, space medicine and astrobiology. Earth observation by satellites, satellite communications, and satellite geolocation involves space science and technology. This is also the case with weather forecasting and technologies that involve the use of remote sensing, global positioning systems, satellite television and communication systems, as well as scientific fields such as astronomy and science of the earth.

These factors lead to acquiring basic knowledge about space technology. It encompasses three main segments, which are space, user, and ground station. Thus, NASA provides an architecture to define space engineering in constructing a mission [8]. Indeed, acquiring an adequate definition of space mission leads to improving basic knowledge and therefore progresses the TRL. It is composed of nine levels defined by NASA and European Space Agency (ESA) for space applications. Table 1 summarizes the TRL’s levels [6, 9].

Indeed, maturity is a concept used in several areas. The term maturity implies a final state following development. The development principle considers a series of phases, passing from an initial stage and some intermediate stages before reaching maturity. This concept proposes to qualify or quantify the development of a given subject. It offers the potential to measure the acquisition of specific capacities at levels of development. This assessment makes it possible to identify the skills to be acquired in order to reach the desired level. Thus, development towards maturity can be described in the form of maturity models allowing the level to be measured in the form of benchmarking. These virtual models are characterized by the use of a scale of progressive stages, or maturity levels (Table 1). This led to describe each level for determining the adequate TRL of such technology’s development which is explained as follows:

- TRL 1: This is the lowest level of maturity of a technology. We begin to evaluate applications of scientific research, for example, in the form of publi-

*Table 1. Technology Readiness Levels*

TRLs	Stage	Definition
1	Basic knowledge about the technology	Report and observation of basic principles
2		Concept of the technology
3	Feasibility research	Analysis for concept’s proof
4		Validation in laboratory environment
5	Development and demonstration of the technology	Validation in relevant environment
6		Development of the prototype demonstration in space or on the ground
7		Test of the prototype in space environment
8	Systems development, test, and operation	Development of the flight model
9		Launch and operation



cations analyzing the fundamental characteristics of the technology.

- **TRL 2:** It defines the beginning of the invention phase. From the observation of the basic principles, it becomes possible to envisage practical applications. There is no evidence or detailed analysis to confirm them. We are still only at the paper studies stage.

- **TRL 3:** It presents the launching of analytical studies and laboratory work concerning the validation of certain elementary building blocks of the technology in order to concretely validate the forecast studies.

- **TRL 4:** During this phase, the basic constituents of the technology were integrated, but in a relatively “unrepresentative” form of a possible system, for example, in the form of a “mock-up” or prototype in the laboratory.

- **TRL 5:** This step serves to represent sharply increasing subsystems. The building blocks are integrated into a complete package allowing the testing of the technology in a realistic simulated environment, for example, in the form of a “very representative” laboratory integration.

- **TRL 6:** Here, we try to test in a representative environment a representative model or a prototype of a system, much more complete than what was tested in step 5, and this represents a key step in demonstrating the maturity of a technology, such as, for example, the testing of a prototype in a laboratory which reproduces the environmental conditions very precisely, or the conditions of operational use.

- **TRL 7:** This level serves to provide a demonstration of a prototype system conforming to the operational system or very close. Represents a strong progression from step 6, with the demonstration of a real prototype in an operational environment, such as, for example, a vehicle or an aerial platform, for example, an aircraft test bench. Information will be gathered at this stage to obtain the suitability to support this technology.

- **TRL 8:** Here, the technology has been proven to work in its final form and under the expected conditions of use. This step is, in most cases, the end of the demonstration, with, for example, the testing and evaluation of the system within the planned system in order to know whether it meets the specifications requested.

- **TRL 9:** It is the stage of application of the technology in its final form, and under representative mission conditions, such as those which may be encountered during operational tests and evaluations, and reliability tests, which includes, for example, employment under operational mission conditions.

### **3. WORK RELATED TO HIGH TRLS ACHIEVEMENT**

Relying on TRLs estimation methods, many organizations integrated their capacities to reach high TRL enhancing techniques and methods. Indeed, this review focuses on analyzing the challenges and opportunities of TRLs related to space mission applications.

Technological evolution in the space domain is a complex process: technologies are interconnected into systems, and these, in turn, are intertwined and interdependent, both with each other and with the physical, social, and institutional environment. Each technological revolution is a set of technological systems, which gradually create the conditions necessary for the emergence of new systems, all following comparable principles and benefiting from the same external factors. The process of multiplication of technological innovations and systems explains the enormous growth potential of each of these constellations of new technologies. This process opens up a new and vast territory for innovation, expansion, and growth. The initial innovations mark the discovery of this territory, while its complete occupation corresponds to the phase of maturity and exhaustion.

Indeed, NASA was among organizations that opened the door for space missions’ innovation and development. It focuses on progressing the level of technology maturity by developing systems related to space applications. Among, we quote those that reached the TRL 5 as an example of achieving the medium level in the scale [10]. It defined the way to achieve this level by developing a conductively cooled 2-micron laser transmitter for a coherent doppler wind lidar system. Here, it provides an adequate platform to progress the TRL towards level 6.

Therefore, its research was conducted to reach the TRL 6 by developing systems for space applications such as solar sail [11, 12] and platform for testing hardware in flight environments [13]. Otherwise,

R. Pierce et al. developed a laser system for space application reaching the TRL 6 [14].

Despite the difficulties surrounding space missions, many projects succeeded in reaching the TRL 9, defining the ways to achieve this goal. A survey provided a summary of systems able to reach level 9, including Guidance, Navigation, and Control (GNC) subsystems for small satellites is presented in [15]. This survey as well concerns sensors and actuators such as Star Trackers, Magnetometers, Sun Sensors, Earth Sensors, Gyroscopes, GPS Receivers, Reaction Wheels, Magnetorquers. In addition, it defined the performance needed to reach this high level. Otherwise, the development of the On-Board Computer (OBC) for small satellites can lead to the progress of the TRL towards level 9 [16]. Besides, didactic project-based rocket development can deal with this objective [17].

Table 2 summarizes the space projects related to TRL enhancement.

Indeed, this domain represents a real gap in achieving a high level of technological maturity regarding complex systems. Ironically, the benefits shift to

countries with few financial resources at the precise moment when the production process is characterized by more intensive use of capital. We could therefore think that only companies in advanced countries have the necessary knowledge in this phase. Yet while new products are part of the early stages of a technological revolution, the knowledge required tends to be in the public domain (available in universities, for example). The only proof of this is the recent case of didactic projects around satellite missions' demonstration and development.

Therefore, it seems possible to devise a strategy for accumulating technological capabilities using mature technologies and then using them to access new and dynamic technologies, but this ability is highly dependent on the specific opportunities created by successive technological revolutions. A thorough understanding of technological developments in advanced countries can be useful for developing countries wishing to design viable strategies. This opens the door for the birth of new amateur and didactic projects based on satellite systems to enhance the TRL of space technology domain.

Table 2. TRL reached for space missions

Mission name	Developed system	TRL achieved
Conductively Cooled 2 Micron Laser Transmitter for Coherent Doppler Wind Lidar System [10]	Conductively-cooled single-frequency 2-micron laser	5
Solar Sail design [11]	Solar sail configuration to address NASA's future space propulsion needs	6
Solar Sail [12]	Solar sail propulsion	6
Satellite Servicing Capabilities Office Testing [13]	Platform for hardware testing	6
Stabilized Lasers [14]	Stabilized Lasers for a satellite application	6
GNC components for small satellites [15]	Star trackers	9
	Magnetometers	9
	Earth sensor	9
	Sun sensor	9
	GPS receiver	9
	Gyroscope	9
	Reaction wheels	9
On-board computer (OBC) [16]	Power-efficient, low-Cost, and flash FPGA based OBC for small-satellites	9
Rocket [17]	Hybrid sounding rocket HEROS	9

#### 4. TECHNOLOGY READINESS LEVEL BASED ON DIDACTIC PROJECTS

Regarding the complex systems related to space applications, the improvement of TRLs in this domain may present challenges for achieving a high level. A survey performed in [18] extracted the difficulties observed in TRL implementation, which can be summarized into three categories: system complexity, planning and review, and validity of the assessment. Thus, didactic projects present a promoting solution to fill the gap in space missions' demonstration and development.

The CubeSat was developed for research and education as the first step for amateur satellites toward the accumulation and test of space applications [19, 20]. This satellite reduces the mission's cost providing an adequate system for space exploration. This is proven by the hundreds of CubeSats launched into orbits [21]. These missions were developed around nano and pico classes of satellites providing an adequate platform for demonstration projects aimed at increasing the maturity of satellite technology.

In fact, the accumulation of space technology knowledge relying on didactic projects leads to developing skills for the construction of pico and nano-satellites [22–24]. In addition, these systems can provide a reliable platform for the development of

satellite subsystems such as attitude determination and control systems [25–27].

On the other hand, “what can we do when our students are bored during the activities, or they are not interested in the topic? The Arduino board based on ATMEGA chipset or similar devices with few sensors or robotics can be the solution”, said Maria Peto [28]. Thus, this kind of system presents an adequate amateur platform to demonstrate satellite development steps. It provides the necessary knowledge to develop a real satellite using low-cost commercialized components. This idea led to the announcement of the birth of a new tiny satellite, such as CanSat, which was proposed by Prof. Robert Twiggs [29]. CanSat systems were developed to avoid barriers to constructing a real satellite, including a similar environment for construction, test, and launch.

Indeed, CanSat offered a fruitful platform as an educational system to practice space engineering knowledge [30–32]. In addition, it allowed the practicing of space operations such as ground station development [33], construction and testing of subsystems [34, 35], and launching techniques [36, 37]. Besides, it opened the door to the development and testing of space missions, such as data communication techniques and analysis [38, 39], and satellite operations and applications [40, 41].

Table 3. TRL achieved by CanSats

Mission	Stage reached	TRL achieved
Development of a didactic satellite for training and research [22] Educational satellite [25], [26], [27]	Validation in laboratory environment	4
Disaster victims monitoring [28]	Validation in relevant environment	5
OPEN prototype design and test [20] Ground station for the CanSat mission [33]	Development of the prototype demonstration on the ground	6
Prototype of CanSat with auto-gyro payload [30] Rover-back CanSat [31] Educative practice of space engineering [32] Data analysis mission for the CanSat [34], [35], [38], [39] Control system for CanSat landing [36], [37] CanSat for monitoring application [40], [41]	Development of the prototype demonstration in space	6
AeroCube 2 lanching [19] CanSat launched to suborbit [42]	Launch and operation	9

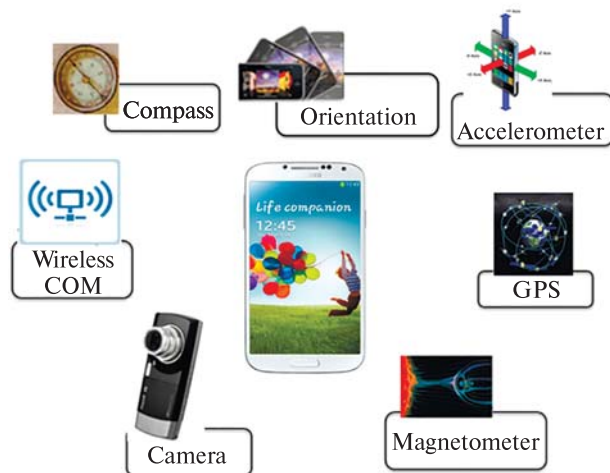


Fig. 1. Smartphone device components

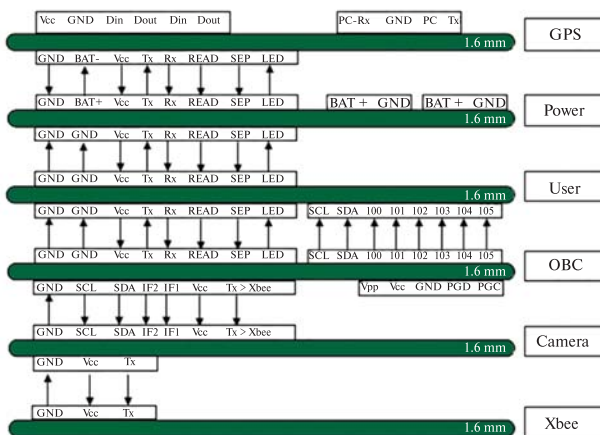


Fig. 2. CanSat Interfaces and boards

CanSat projects proved their efficiency to enhance the maturity of the space technology that reaches a high TRL encompassing all the steps to develop a real satellite [42]. We can consider that this tiny satellite has the potential to reach a high TRL despite its educational purpose. It succeeded to develop and practice knowledge of space engineering. Thus, it seemed reasonable to estimate the TRL of didactic projects to prove their impact on increasing the maturity of space engineering. Therefore, relying on TRL estimation tools, table 3 summarises the TRL reached by the presented examples.

### 5. DISCUSSION

TRLs have become a necessary tool to develop in the engineering domain, including the space engineering field, that presents a vital element of satellite application developments. Due to the gaps in related investments in this domain, many organizations and universities have developed systems around demonstration tools, such as satellite-based smartphones [43, 44] and CanSat systems that offer reliable platforms to acquire and practice knowledge about space engineering using affordable tools. These projects can be classified into two categories: device-based integrated/collected components.

**5.1. Device-based integrated components.** This system can be summarized in one tool of smartphone type that includes new software features, a camera, GPS receiver, and many miniaturized sensors, as presented in figure 1.

The Android platform is proved to withstand on-board flights in the atmosphere to low Earth orbit [43, 44]. Besides cost and power optimization, there are other benefits of adapting mobile device processors: better software development tools with better version control and a single power supply (typically 3, 3V) that presents the significant challenges of space applications. It has many integrated peripherals, such as magnetometers, accelerometers, and gyroscopes, to introduce and develop space applications for attitude determination and mission control. It contains several additional interfaces: the USB and the wireless connections (Wifi and Bluetooth), which create a convenient platform for data transmission while the satellite mission operates. Here, the novelty lies in the use of one tool to fully demonstrate satellite missions with achieving a high TRL.

**5.2. Device-based collected components.** This system presents a platform that connects many components with a central processing tool, such as the CanSat device. It is a small satellite fit within a soda can, which weighs less than 1 kg. This electronic device includes all development cycles in order to fabricate a satellite involving the design, fabrication, and launch [45]. It has been created to provide an opportunity to acquire the basic knowledge of space engineering.

Following the mission of the CanSat assembled and tested during the 6th CanSat Leader Training Program [35], we can learn all the necessary steps to

build CanSats in order to fabricate, test, and launch a picosatellite. In addition, it presents a fruitful tool to enhance TRL in space engineering of a low-cost mission.

The CanSat contains 6 circular boards arranged as shown in figure 2, which illustrates the interfaces, boards, and the interconnection between them.

The CanSat has the same subsystems as a real satellite; the microcontroller board as an OBC (On-Board Computer), the GPS and sensors boards as an attitude determination subsystem, the Xbee module as a communication subsystem, the power board as a power subsystem, and the payload of this CanSat is a camera.

Based on this, CanSat can be considered a small satellite. This prototype demonstrates data management using a PIC microcontroller and attitude determination using a GPS receiver and an accelerometer, gyroscope, and temperature sensors. This fact makes it very efficient as a first step towards the development of a real satellite, including analysis, design, and implementation of subsystems' integration. This leads to achieving TRL 4.

The prototype was tested on the ground, including vibration and temperature tests. Finally, the flight model was developed and launched to about an altitude of 100 meters in order to be tested in a space environment achieving a high level of TRL [35].

## 6. CONCLUSION

The concept of maturity originates in the field of quality management. Many fields and disciplines have drawn inspiration from the concept of maturity to generate their own maturity model. Among all its types, they share one common aspect: Technology Readiness Level.

Despite the achievement of high TRL related to space technology, it is presenting a big challenge for emerging countries that are developing new tiny satellites as didactic projects. This innovation opens new and interesting perspectives within the framework of the mastery of space technology. In our review, we tried to substantiate the efficiency of satellite missions based on a didactic platform to enhance TRLs. It is an excellent educational tool for validating possible missions.

## REFERENCES

1. Bouwmeester J., Guo J. (2010). Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, **67**, 854–862.
2. Batista C. L. G., et al. (2019). Towards increasing nanosatellite subsystem robustness. *Acta Astronautica*, **156**, 187–196.
3. Denby B., Lucia B. (March 2020). *Orbital edge computing: Nanosatellite constellations as a new class of computer system*. Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, 939–954.
4. Shakhmatov E., et al. (2015). SSAU project of the nanosatellite SamSat-QB50 for monitoring the Earth's thermosphere parameters. *Procedia Engineering*, **104**, 139–146.
5. Camps A. (2020). Nanosatellites and applications to commercial and scientific missions. *Satell. Mission. Technol. Geosci*, 145–169.
6. TEC-SHS E. S. A. (2008). Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications. URL: [https://artes.esa.int/sites/default/files/TRL\\_Handbook.pdf](https://artes.esa.int/sites/default/files/TRL_Handbook.pdf) (Last accessed 28.01.2022).
7. Straub J. (2015). In search of technology readiness level (TRL) 10. *Aerospace Sci. and Technology*, **46**, 312–320.
8. Shishko R., Aster R. (1995). NASA systems engineering handbook. *NASA Special Publ.*, **6105**, 1–155.
9. Héder M. (2017). From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *Innovation J.*, **22**, 1–23.
10. Shuman T., et al. (2013). Development of a TRL-5 conductively-cooled 2-micron laser transmitter for coherent doppler wind lidar system. *Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIV. International Society for Optics and Photonics*. **8872**.
11. West J., et al. (2003). Bringing an effective solar sail design toward TRL 6. *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, AL.*, 1–8.
12. Young R., et al. (2007). TRL assessment of solar sail technology development following the 20-meter system ground demonstrator hardware testing. *48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2248.

13. Sanders S. (2015). Satellite Servicing Capabilities Office Testing. *NASA USRP – Internship Final Report*, 1–7.
14. Pierce R., et al. (2012). Stabilized lasers for space applications: a high TRL optical cavity reference system. *Quantum Electronics and Laser Science Conference pp. JW3C-3*. Optical Society of America, San Jose, California United States.
15. Burton R., et al. (2016). State of the art in guidance navigation and control: A survey of small satellite GNC components. *Proc. Adv. Astron. Sci.*, 157
16. Kandala A., et al. (2021). Development of a Power-Efficient, Low Cost, and Flash FPGA Based On-Board Computer for Small-Satellites. 35th Annual Small Satellite Conference, Utah State University, Logan, UT, 1–5
17. Kobald M., et al. (2017). Hybrid Sounding Rocket HEROS: TRL 9. Proceedings of the 7th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS). Milano, Italy, 3–7.
18. Olechowski A., et al. (2015). Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. Portland international conference on management of engineering and technology (PICMET). *IEEE*, 2084–2094.
19. Nugent R., et al. (2008). The CubeSat: The Picosatellite Standard for Research and Education. *AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition 9 – 11 September 2008*, San Diego, California, 1–11.
20. Berk J., et al. (2013). The open prototype for educational NanoSats: Fixing the other side of the small satellite cost equation. *IEEE Aerospace Conference*, 1–16.
21. Villela T., et al. (2019). Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. *Int. J. Aerospace Engineering*, 1–13.
22. Vicente V. E., et al. (2009). Successful Development of a Portable Didactic Satellite for Training and Research in Satellite Technology. CORE-2009, 10th Computing Congress, CIC-IPN. México City.
23. Vicente-Vivas V. E., et al. (2009). SATEDU the didactic satellite, from on-the job classroom training to space experimentation. International Conference on Engineering Education (ICEED). *IEEE*, 247–249.
24. Reyneri L., et al. (2007). PicPot: a small satellite with educational goals. *Proc. 18th EAAEIE Conf. Innov. Edu. Elect. Inf. Eng.*, 1–4.
25. Ben Bahri O., et al. (2017). Smartphone didactic platform for satellite attitude determination demonstration and development. International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). *IEEE*, 1–4.
26. Mendoza B., et al. (2012). Embedded attitude control system for the educative satellite SATEDU. CONIELECOMP, 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers. *IEEE*, 118–123.
27. Ben Bahri O., Besbes K. (2018). Didactic satellite based on Android platform for space operation demonstration and development. *Adv. in Space Res.* **61**, 1501–1511.
28. Pet M. (2016). CanSat, Arduino – Physics at Székely Mikó Science Club. *Proc. of the Int. Conf. Teaching Physics Innovatively*. Publisher: Graduate School for Physics, Faculty of Science, Eotvos Lorand University, Budapest, Hungary, 169–174.
29. Kawashima R. (2016). CanSat leader training program: past, present and future. *Ciencia UANL*, **19**, 76–82.
30. Ramadhan R., et al. (2019). Prototype of CanSat with Auto-gyro Payload for Small Satellite Education. 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). *IEEE*, 243–248.
31. Aly H., et al. (2013). Project-based space engineering education: Application to autonomous rover-back CanSat. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). *IEEE*, 1087–1092.
32. Miyazaki Y., Yamazaki M. (2013). A practical education of space engineering by using CanSat and pico-satellite-Fruitful collaboration with UNISEC for success of student satellite program. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). *IEEE*, 1081–1086.
33. Paudel S., et al. (2017). Development of CanSat Ground-Station using LabVIEW. *Proceeding of MARS Summit (India)*, 1–4.
34. Petó M. (2013). Experiments with Cansat. *ICPE-EPEC*, 1–9.
35. Colin A. (2017). A pico-satellite assembled and tested during the 6th CanSat Leader Training Program. *J. applied research and technology*, **15**, 83–91.
36. Kizilkaya M., et al. (2017). CanSat descent control system design and implementation. 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). *IEEE*, 241–245.
37. Ay S., et al. (2011). Design and navigation control of an advanced level CANSAT. Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST. *IEEE*, 752–757.
38. abulo lu C., et al. (2011). Mission Analysis and Planning of a CANSAT. Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST., *IEEE*, 794–799.
39. Ostaszewski M., et al. (2018). Analysis of data collected while CanSat mission. 19th International Carpathian Control Conference (ICCC). *IEEE*, 1–4.
40. Colin A., Manuel J. L. (2015). The CanSat technology for climate Monitoring in small regions at altitudes below 1 km. *IAA Climate Change & Disaster Management Conference*, 1–9.
41. Islam T., et al. (2019). Design and Development of a Weather Monitoring Satellite, CanSat. 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET). *IEEE*, 1–6.

42. Sako N., et al. (2001) Cansat suborbital launch experiment-university educational space program using can sized picosatellite. *Acta astronautica*, **48**, 767–776.
43. Gozalez J. (Sept 2013). Smartphones Sent into Space [Mobile Radio]. *Vehicular technology magazine, IEEE*, 13–18.
44. Bridges C., et al. (2011). STRaND-1: The world's first smartphone nanosatellite. Space Technology (ICST): 2nd International Conference. *IEEE*, 1–3.
45. Yamaura S., et al. (June 2011). Report of CanSat Leader Training Program. Recent Advances in Space Technologies (RAST): 5th International Conference. *IEEE*, 856–860.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2022

Після доопрацювання 28.01.2022

Прийнято до друку 20.04.2022

Received 28.01.2022

Revised 28.01.2022

Accepted 20.04.2022

*О. Бен Бахрі*

Департамент науки і техніки, Коледж Ранья, Університет Таїфа  
P.O. скринька 11099, Таїф 21944, Саудівська Аравія

### ВПЛИВ ДИДАКТИЧНИХ СУПУТНИКІВ НА ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗНАНЬ З КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ (КОСМІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ): ОГЛЯД

Космічні технології набувають все більшого значення в сучасному суспільстві. Маючи багато застосувань у повсякденному житті, вони зумовлюють подальший прогрес та добробут людства. Звідси витікає необхідність забезпечення відповідного рівня навчання, досліджень і розробок у цій галузі освоєння космосу. У статті розглядається використання малих супутників для отримання базових знань у галузі космічних технологій. Подальший розвиток цих знань веде до створення космічних місій, які в свою чергу забезпечують прогрес рівня технологічної готовності (TRL), визначеного міжнародною шкалою вимірювань. Цей рівень характеризує загальну технологічну зрілість суспільства. У огляді робиться висновок, що використання недорогих або навчальних супутників може сприяти вдосконаленню знань молодих інженерів і конструкторів та демонстрації важливості космічних досліджень. Ми вважаємо, що для досягнення цієї мети можна використати вбудовані компоненти з функціями, аналогічними смартфонам. В статті обговорюються два типи таких компонентів для демонстрації їх ефективності в космічних інженерних розробках.

**Ключові слова:** CubeSat, аналіз даних, дидактика, космічна інженерія, рівень технологічної готовності, супутник.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.048>

UDK 621.37.+551.553.5

**F. I. BUSHUEV**<sup>1</sup>, Researcher

**M. P. KALIUZHNYI**<sup>1</sup>, Head of the Subdivision, PhD. in Phys. & Math.

E-mail: niikalyuzhny@ukr.net

**V. F. KRIUCHKOVSKIY**<sup>1</sup>, Engineer

**M. O. KULICHENKO**<sup>1</sup>, Head of the Subdivision, PhD. in Phys. & Math.

**O. V. SHULGA**<sup>1</sup>, Director, Associate Senior Researcher, Dr. Sci. in Phys. & Math.

**Z. ZHANG**<sup>2</sup>, Assistant, PhD.

**V. BEZRUKOV**<sup>3</sup>, Researcher

**YE. V. MALYNOVSKIY**<sup>4</sup>, Head of Department

**O. M. REZNICHENKO**<sup>5</sup>, Senior Researcher, PhD. in Phys. & Math.

**O. B. BRYUKHOVETSKY**<sup>6</sup>, Engineer

**G. TUCCARI**<sup>7</sup>, Executive director, PhD.

<sup>1</sup> Research Institute «Mykolaiv Astronomical Observatory»

1, Observatorna Str., Mykolaiv, 54030 Ukraine

<sup>2</sup> Shanghai Astronomical Observatory

80 Nandan Rd., Shanghai, 200030 People's Republic of China

<sup>3</sup> Ventspils University of Applied Sciences

101, Inzenieru Str., Ventspils, Latvia, LV-3601

<sup>4</sup> Rivne Minor Academy of Science of School-Age Youth

17, Simon Petliura Str., Rivne, 33013 Ukraine

<sup>5</sup> Institute of Radio Astronomy of the NASU

4, Mystetstv Str., Kharkiv, 61000 Ukraine

<sup>6</sup> Western Center of Radio Engineering Surveillance

Kosmonavtiv Str., Mukacheve, 89600 Ukraine

<sup>7</sup> HAT-Lab srl, Spin-off Company of Italian National Astrophysics Institute

Catania, 95127 Italy

## OBSERVATIONS OF GEO AND LEO SATELLITES: RADIO ENGINEERING MEANS OF THE MYKOLAIV ASTRONOMICAL OBSERVATORY

---

*The radio engineering means of the RI “Mykolaiv Astronomical Observatory” are fully passive. To track satellites, they use radio signals emitted by the satellites themselves. Thus, the following means were developed and put into operation: 1) Simple INTerferometer NETwork (SintNet) for monitoring the orbital position of geostationary (GEO) satellites; 2) Doppler station for clarifying the orbital elements of low Earth orbit (LEO) satellites.*

*Two SintNets operate now: European and Chinese. The European SintNet consists of 10 stations and tracks three co-located satellites simultaneously. The Chinese SintNet consists of four stations and tracks one satellite. The positional error (standard deviation) of satellites is about 200 m.*

Цитування: *Bushuev F. I., Kaliuzhnyi M. P., Kriuchkovskiy V. F., Kulichenko M. O., Shulga O. V., Zhang Z., Bezrukovs V., Malynovskiy Ye. V., Reznichenko O. M., Bryukhovetsky O. B., Tuccari G.* Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 48–53. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.048>



*The Doppler station operates in the frequency range 430...440 MHz. Signal spectrum analysis is used to determine the frequency  $F(t)$  of the radio signal emitted by an LEO satellite and received by the station at time  $t$ . The SGP4/SDP4 analytical model of the satellite motion is applied to analyze  $F(t)$  and to clarify the elements of the satellite orbit. Errors in measuring the Doppler frequency shift and time are 4 m/s and 30 ms, respectively.*

**Keywords:** *interferometer, geostationary satellites, low-Earth orbit satellites, Doppler effect.*

## INTRODUCTION

The Simple Interferometer Network (SintNet) was initially developed at the RI «Mykolaiv Astronomical Observatory» as an independent radio engineering means for tracking future Ukrainian geostationary satellite Lybid. The first SintNet consisted of two stations and existed for 2 days in August 2011 [3]. At the same time, in 2010–2013, SES (Société Européenne des Satellites), together with Fraunhofer Research Institute, conducted the project named PaCoRa (Passive Correlation Ranging, European Space Agency). The PaCoRa system is considered by ESA as a high-precision alternative to active ranging radars [6]. As it turned out, the SintNet is a prototype of the PaCoRa system. Both systems are completely passive. They consist of geographically separated stations or terminals that synchronously receive payload signals of satellite TV emitted by tracked satellites. The coordinates of the satellites are determined from the known station coordinates and the measured values of Time Difference Of Arrival (TDOA). To calculate TDOA, correlation analysis of signals emitted by satellites and received by stations is used.

According to [10], the PaCoRa system of four stations should have a maximum error in calculating the coordinates of a geostationary satellite of approximately 119 m. This error was obtained as a result of the simulation. For the SintNet, our measurements show that the standard deviation of the TDOA is about 8.7 ns [4]. The orbital position (or orbital elements) of the satellite is determined using a numerical model of satellite motion and measured values of the TDOA obtained during 24h. The numerical model takes into account the gravitation of the Sun, Moon, and non-spherical Earth [7]. Herewith the standard deviation of the satellite's coordinates is about 200 m [2]. It has also been shown that the networks of three and more stations provide close coordinate precision of about 200 m [2, 11].

The urgency of the problem of clarifying the orbit elements of low Earth orbit (LEO) spacecraft has

been increased sharply due to the appearance of a huge amount of satellites belonging to the Internet systems, which are being created now. About 16000 such satellites will be put into service by 2030 like OneWeb, StarLink, or TelSat. The Doppler station is designed to track low Earth orbit artificial satellites, emitting radio signals in the frequency range 430...440 MHz, and to clarify orbit elements of the tracked satellites by measuring the Doppler shift of frequency of their radio signals. In the frequency range 430...440 MHz, radio beacon signals of 18 LEO satellites were detected [8]. Thus, there is possible to solve the main methodological and technical issues of clarifying the orbital position of satellites by the Doppler frequency shift of their radio beacons. Obtained decisions may be used in other frequency bands, including frequency bands of the Internet systems.

## 1. SIMPLE INTERFEROMETER NETWORK

There are currently two SintNet in operation: the European and Chinese. The European SintNet consists of 10 stations and Chinese — 4 stations. Stations of the European SintNet are located in Ukraine (Mykolaiv, Rivne, Kharkiv, and Mukacheve), Latvia (Ventspils), and Italy (Pietramarina). Three stations are located in Mykolaiv and two stations each is in Ventspils and Rivne. Stations of the Chinese SintNet are located in Shanghai, Duyun, Urumqi, and Changchun [9]. Both SintNets have processing centers. The processing center of European SintNet is located in Mykolaiv and Chinese SintNet in Shanghai.

The Chinese network tracks one satellite, Apstar-6C, which is the only one in the cell at 134° of East longitude [11]. Until May this year, the European network tracked the orbital position of two satellites, Eutelsat-13B and C, located in the same cell at 13° E together with Eutelsat-13E. And this is despite the fact that the number of network stations allows tracking 3 satellites. The network cannot track Eutelsat-13E because it emitted only DVB-S2 signals, which cannot be processed correctly by DVB-S receivers of the

stations [8]. Multistandard DVB-S(S2) receiver OMI-COM was implemented on three stations in Mykolaiv, Ventspils, and Rivne in May, 2021. That allows now tracking all three satellites co-located in the same geostationary cell at 13 degrees of East longitude.

Both SintNets have identical hardware and software. The composition and main characteristics of the equipment and software of SintNet stations are given in [5]. The stations have the standard antenna-feeder system for the reception of DVB-S(S2) signals. Most stations of both SintNets have antennas with a diameter of around 1 m. An important feature of the stations is the use of standard digital satellite television DVB-S(S2) receivers, modified in terms of the signal output from their quadrature detectors, as well as digital oscilloscopes as external ADCs. Synchronization of measurements is carried out using GPS receivers ThunderBolt-E. The error of the PPS (Pulse-Per-Second) signal is 15 ns. It should be noted that 4 stations of the European SintNet have computers that work under Windows-XP, and computers of the other 6 stations under Windows-7. The processing center in Mykolaiv has a more powerful computer (64-bit processor, 32 cores, 32 GB memory, and a 3 TB hard disk for saving primary observation data). Description of the processing center software of TDOA and orbit determination of tracked satellites is given in [4, 10]. The existing SintNet software allows the completely automatic acquiring of observational data and their transfer from the stations to the processing center. For further data processing and calculation of TDOA and orbital elements, it is necessary to run the appropriate programs manually.

Positions of the satellites were calculated to confirm a fact of tracking all three co-located satellites by the European SintNet. Orbital elements obtained by the network on May 29-30, 2021 were used to calculate the positions. Herewith, the distances between the satellites varied in the range from 7 to 81 km, which significantly exceeds the error of SintNet coordinate determination, equal to 200 m. So, the European SintNet really tracks now all three co-located satellites, and the implementation of multistandard receiver OMI-COM allows now tracking satellites regardless of the standard of signals they emit.

As a result of continuous observations, catalogs of daily values of orbital elements (numerical model)

for Eutelsat-13B (since Feb 2015), Eutelsat-13C (since Sep 2018), and Eutelsat-13E (since May 2021) were obtained.

## 2. DOPPLER STATION

A detailed description of the Doppler station hardware and software is given in [1, 9]. The station consists of a 10-sections antenna omnidirectional in the upper hemisphere, a unit of antenna switches, and software defined radio (SDR) that includes a personal computer and receiver. Microchip Realtek RTL2832U is used in the receiver as a demodulator of radiofrequency signals of terrestrial digital television and radio "DVB-T+DAB+FM" (Digital Video Broadcasting-Terrestrial + Digital Audio Broadcasting + Frequency Modulation). The antenna switch allows switching antenna sections automatically from the computer according to the azimuth and elevation of a tracked satellite. The satellite coordinates are calculated using TLE-orbital elements from <https://www.space-track.org>.

A synthesizer has recently been developed and implemented. Using the synthesizer solves two problems: 1) increasing the frequency stability of the receiver and 2) measuring the frequency and time of the received radio beacon signals. The synthesizer forms two signals: an external 28.8 MHz reference signal for the receiver and a pilot signal. The external reference signal replaces the internal one of the receiver. The pilot signal is used to estimate the frequency and time of signals received by the station. Both signals are phase-locked to the signal of 10 MHz generated by the GPS receiver. The pilot signal consists of 1 Hz packages of 100 kHz pulses. The PPS signal of the GPS receiver is used for forming the 1Hz packages. The pilot signal is applied to the input of the receiver along with signals of satellite radio beacons.

There are two modes of the Doppler station operating: real-time and post-processing [1, 9]. In real-time, three tasks are now performed: 1) automatic tracking one of a given number of low-Earth-orbit artificial satellites, 2) recording payload and pilot signals into wav-files, 3) synchronization of computer time using GPS. The criterion for selecting a satellite for tracking is the closest passage of the satellite to the station. Program TSIP\_SYN is used for the time synchronization of the Doppler station computer by

GPS. The program was specially developed earlier to synchronize the computer time of SintNet stations [3]. This program provides the difference between the time of the computer and GPS at a level not exceeding 0.5 seconds. As an illustration, a screen of the station computer during registration (recording) satellite radio beacon and the pilot signal is given in Figure. The radio beacon signal emitted by the OSCAR-19 satellite is marked by digit 1 and a 100 kHz harmonic of the pilot signal by 2.

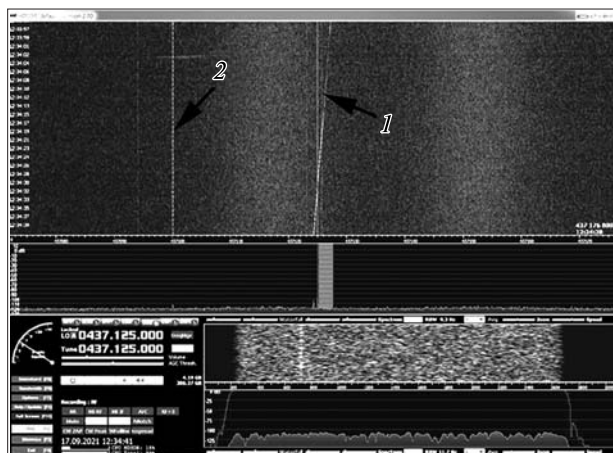
During post-processing, the next tasks are performed by analyzing the wav-files: 1) determination of frequency and time corrections; 2) searching satellite radio beacon signal and determining radio beacon frequency as a function of time  $F(t)$  using the corrections of frequency and time; 3) clarifying orbital elements using measured function  $F(t)$  and orbital elements from *space-track.org* as the initial approximation. Internal errors in measurements of Doppler frequency shift and time synchronization have been obtained during the determination of frequency and time corrections. The relative frequency error does not exceed  $10^{-10}$ , and the timing error is less than 30 ms, while the frequency error is about 0.06 Hz or 4 cm/s in the 430–440 MHz frequency range.

### 3. DISCUSSION

Further upgrading the hardware and software of the European SintNet may be proposed to increase its consumer value, namely:

- upgrading the SintNet software for completely automated processing of the observation data up to orbital elements determination;
- implementing DVB-S(S2) receiver OMICOM on all network stations;
- developing WEB-service for ongoing representation of orbital positions of tracked satellites;
- improving network accuracy using a more accurate reference oscillator for observation synchronizing and analog-digital converting.

Clarified orbital elements of tracked satellites are not obtained yet after the synthesizer has been implemented in the Doppler station composition. Earlier, as a result of clarifying satellite orbital elements, the reduction of the difference between measured and model values of the radial velocity was obtained on average by 1.6 m/s [9].



HSDR program screenshot with payload signal of an OSCAR-19 radio beacon (1) and a 100 kHz harmonic of the pilot signal (2)

### CONCLUSIONS

1. Now, European SintNet consists of 10 stations and simultaneously tracks three satellites Eutelsat (13B, 13C, and 13E), co-located in a 13 °E cell, including a satellite (Eutelsat-13E) that emits only DVB-S2 signal. Tracking of Eutelsat-13E has become possible due to the implementation of the multi-standard DVB-S(S2) receiver OMICOM at three network stations in Ventspils, Rivne, and Mykolaiv.

Catalogs of daily orbital elements (numerical model) for Eutelsat-13B, Eutelsat-13C, and Eutelsat-13E were obtained as a result of continuous observations since Feb 2015, Sep 2018, and May 2021, respectively.

The existing software of the SintNet allows the completely automatic acquiring of observation data and their transfer from the stations to the processing center.

2. Doppler station of RI “MAO” allows automatically tracking only one low-Earth-orbit artificial satellite out of a given number at a time. The criterion for selecting a satellite for tracking is the closest passage of the satellite to the station. The synthesizer is developed and implemented to provide forming:

- the 28.8 MHz reference signal of the RTL2832U receiver of Doppler station,
- the pilot signals, which are the 1 Hz packages of 100 kHz pulses.

The signals are phase-locked to the signal of 10 MHz generated by the station GPS receiver.

The software has been developed and implemented for the measurements of frequency and time using pilot signals. Internal errors in frequency and time measurements have been obtained. The relative frequency error does not exceed  $10^{-10}$ . The error of time measurement is less than 30 ms. The development

will make it possible to clarify the orbital elements of satellites taking into account the measurements of frequency and time. An external comparison of orbital positions of tracked satellites is planned to be carried out using data from optical observations and the ILRS (International Laser Ranging Service).

## REFERENCES

1. Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Khalaley M., et al. (2018). Doppler station for orbital tracking of low-orbit spacecrafts by their radio beacon signals. *Odessa Astron. Publs*, **31**, 167–170.
2. Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Shulga O., et al. (2017). The network of passive correlation ranging for geostationary satellites. In Proceedings of the 9th IAASS Conference Session 11: Space Traffic Control – I, Toulouse (France), 18–20 October 2017, 213–219.
3. Bushuev F. I., Kaliuzhnyi N. A., Slivinsky A. P., Shulga A. V. (2012). Determination of the range to telecommunication geostationary satellites using satellite television signals. *Radiophys. and radioastron.*, **17**, No. 3, 282–290 [in Russian].
4. Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Sybiryakova Ye., et al. (2016). Results of the ongoing monitoring of the position of a geostationary telecommunication satellite by the method of spatially separated basis receiving of digital satellite television signals. *Latvian J. Phys. and Technical Sci.*, **53**, No. 5, 5–16
5. Bushuev F. I., Kaliuzhnyi M. P., Sybiryakova Ye. S., Shulga O. V., Moskalenko S. S., Balagura O. A., Kulishenko V. F. (2016). The radio-engineering complex for determining coordinates of a geostationary telecommunication satellite. *Kosmichna nauka i tehnologia*, **22**, No. 3, 50–59.
6. ESA. TELECOM ARTES.PROGRAM. Passive Correlation Ranging (PaCoRa). URL: <https://artes.esa.int/projects/passive-correlation-ranging-pacora> (Last accessed 09.11.2021).
7. Kaliuzhnyi M., Bushuev F., Shulga O., et al. (2016). International network of passive correlation ranging for orbit determination of a geostationary satellite. *Odessa Astron. Publs*, **29**, 203–206.
8. Kaliuzhnyi M., Zhang Z., Bezrukovs V., Bushuev F., Shulga O., Reznichenko O., Bryukhovetsky A., Malynovskiy Y., Biryukov I. (2020). A network of global monitoring of positions of geostationary satellites by their payload radio signals. *Astron. and Astrophys. Transactions*, **32**, No. 1, 509–514. URL: <https://www.aaptr.com/> (Last accessed 09.11.2021).
9. Kryuchkovskiy V., Bushuev F., Kaliuzhnyi M., Khalaley M., Kulichenko M., Shulga O. (2019). First results of clarifying of orbital elements of low-orbit spacecraft using observations of the RI «MAO» Doppler station. *Odessa Astron. Publs*, **32**, 162–164.
10. Passive Ranging for Geostationary Satellites: On a Novel System and Operational Benefits. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2014-1857> (Last accessed 09.11.2021).
11. Zhang Z., Wang W., Yang P., Kaliuzhnyi M., Mi L., Li G., Li P., Tang Z., Cui L., Huang Y., Wang G. (2020). Micro VLBI network for GEO satellite monitoring. *Chinese Space Sci. and Technology*. **40**, No. 5, 119–125. URL: <http://zgkj.cast.cn/CN/abstract/abstract11225.shtml> (Last accessed 09.11.2021).

Стаття надійшла до редакції

18.01.2022

Received 18.01.2022"

Після доопрацювання

13.04.2022

Revised 13.04.2022"

Прийнято до друку

20.04.2022

Accepted 20.04.2022

Ф. І. Бушув<sup>1</sup>, наук. співроб.

М. П. Калюжний<sup>1</sup>, зав. сектору, канд. фіз.-мат. наук

E-mail: niikalyuzhny@ukr.net

В. Ф. Крючковський<sup>1</sup>, інженер-дослідник

М. О. Куліченко<sup>1</sup>, зав. сектору, канд. фіз.-мат. наук

О. В. Шульга<sup>1</sup>, директор, старш. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук

Дж. Джанг<sup>2</sup>, асистент наукового співробітника, PhD.

В. Безруков<sup>3</sup>, наук. співроб.

Є. В. Малиновський<sup>4</sup>, зав. відділу

О. М. Резніченко<sup>5</sup>, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

О. Б. Брюховецький<sup>6</sup>, інж.

Дж. Туккарі<sup>7</sup>, виконавчий директор, PhD

<sup>1</sup> Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія»

вул. Обсерваторна 1, Миколаїв, Україна, 154030

<sup>2</sup> Шанхайська астрономічна обсерваторія

200030, Нандан Роуд, Шанхай, Китайська Народна Республіка

<sup>3</sup> Вентспілський університет прикладних наук

вул. Інженерна, Вентспілс, Латвія, LV-3601

<sup>4</sup> Рівненська Мала академія наук учнівської молоді

вул. Симона Петлюри 17, Рівне, Україна, 33013

<sup>5</sup> Радіоастрономічний інститут НАНУ

вул. Мистецтв 4, Харків, Україна, 61000

<sup>6</sup> Західний центр радіотехнічних спостережень

вул. Космонавтів, Мукачеве, Україна, 89600

<sup>7</sup> NAT-Lab srl, Науково-дослідна лабораторія Італійського національного астрофізичного інституту

95127, Катанія, Італія

#### СПОСТЕРЕЖЕННЯ GEO- І LEO-СУПУТНИКІВ РАДІОТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ НДІ «МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ»

Радіотехнічні засоби НДІ МАО повністю пасивні. Для відстеження супутників вони використовують радіосигнали, які випромінюють самі супутники. Таким чином, розроблено та введено в експлуатацію: 1) проста мережа інтерферометрів (SintNet) для моніторингу орбітального положення геостационарних супутників (GEO); 2) доплерівська станція для уточнення елементів орбіти низькоорбітальних супутників Землі (LEO).

Сьогодні працюють дві мережі SintNet: європейська і китайська. Європейська мережа SintNet складається з 10 станцій і відстежує три супутники одночасно. Китайська мережа SintNet складається з чотирьох станцій і відстежує один супутник. Похибка визначення координат супутників становить близько 200 м.

Доплерівська станція працює в діапазоні частот 430...440 МГц. Вона використовує аналіз спектру сигналу для визначення частоти  $F(t)$  радіосигналу, що випромінюється супутником LEO і приймається станцією в момент часу  $t$ . Для аналізу  $F(t)$  та для уточнення елементів орбіти супутника застосовано аналітичну модель руху супутника SGP4/SDP4. Похибки вимірювання доплерівського зсуву частоти та часу становлять 4 см/с і 30 мс відповідно.

**Ключові слова:** інтерферометр, геостационарні супутники, низькоорбітальні супутники Землі, ефект Доплера.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.054>

УДК 520.8

**Є. Б. ВОВЧИК**, пров. інж., канд. техн. наук

E-mail: [evavovchyk@ukr.net](mailto:evavovchyk@ukr.net)

**А. І. БІЛІНСЬКИЙ**, пров. інж.

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3647-9346>

E-mail: [slr1831@ukr.net](mailto:slr1831@ukr.net)

**К. П. МАРТИНЮК-ЛОТОЦЬКИЙ**, інж.

E-mail: [langurek@gmail.com](mailto:langurek@gmail.com)

**Н. В. ВІРУН**, пров. інж.

E-mail: [n.virun@gmail.com](mailto:n.virun@gmail.com)

**І. Я. ПІДСТРИГАЧ**, зав. відділу

E-mail: [ipid@email.ua](mailto:ipid@email.ua)

**Р. Т. НОГАЧ**, пров. інж.

E-mail: [rtnohach@gmail.com](mailto:rtnohach@gmail.com)

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка  
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів, Україна, 79005

## ОПТИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ШТУЧНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У ЛЬВІВСЬКІЙ АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ

*Космічне сміття стає все більшою загрозою для космічних місій, зокрема для супутникового зв'язку, для виведення на орбіту нових супутників, для програм навігації та вимірювання часу, навіть для спостережень Землі. Навколоземний простір стає все більш перевантаженим, тому потреба у відстеженні космічних об'єктів та наданні інформації про діяльність у космосі стає критичною, і найбільш актуальним є попередження зіткнень або пошкоджень, спричинених космічним сміттям. Серед методів стеження за штучними об'єктами є оптичні, які надають інформацію про положення вибраного об'єкта (позиційні спостереження), відстань до об'єкта (лазерні спостереження), поведінку об'єкта на орбіті та його форму (фотометричні спостереження). У статті описуються спеціальний апаратурний комплекс та програмне забезпечення, якими обладнана Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка для проведення оптичних спостережень.*

**Ключові слова:** штучні космічні об'єкти, оптичні спостереження.

### ВСТУП

З моменту запуску першого супутника у 1957 р. навколоземний простір заповнився сміттям: зараз на орбітах перебувають понад 23000 об'єктів розміром 10 см і більше, мільйони менших фрагментів, і тільки 6 % об'єктів експлуатуються [9]. Поширення космічного сміття може вплинути на супутникові послуги, якими користується

людство, зокрема може вплинути на телекомунікацію, утруднити дистанційне зондування Землі, навігацію, хронометраж тощо. Тому одним з найважливіших завдань є спостереження за якомога більшою кількістю штучних небесних об'єктів.

Серед методів спостереження за штучними космічними об'єктами (КО) є радіолокацій-

Цитування: Вовчик Є. Б., Білінський А. І., Мартинюк-Лотоцький К. П., Вірун Н. В., Підстригач І. Я., Ногач Р. Т. Оптичні спостереження штучних космічних об'єктів у Львівській астрономічній обсерваторії. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 54—60. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.054>

ні та оптичні. За допомогою оптичних методів можна одержати інформацію для прогнозу про положення вибраного об'єкта (позиційні спостереження), про відстань до об'єкта (лазерна віддалеметрія), про поведінку об'єкта на орбіті та його форму (фотометричні спостереження). Максимальну інформацію дають комплексні спостереження, проведені з одного пункту та синхронні спостереження, проведені з різних пунктів [3].

#### АПАРАТУРНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛЬВІВСЬКОГО ПУНКТУ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ШТУЧНИМИ КОСМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

В Астрономічній обсерваторії (АО) спостереження штучних космічних об'єктів ведуться з 1957 року [1]. Тепер у АО сформовано комплекс апаратури, за допомогою якого можна реалізувати позиційні, фотометричні та лазерно-локаційні спостереження.

Позиційні спостереження ведуться за допомогою невеликих телескопів (діаметри від 85 до 350 мм), встановлених на автоматизованому монтуванні телескопа Meade DS2130 або на гід телескопа ТПЛ-1М (рис. 1).

Використання різних оптичних систем та різних монтувань для гідуювання об'єкта визначається поставленою задачею. Світлоприймачами є ПЗЗ-камери WAT-902H2 і LCL 902K у телевізійному режимі.

З фотометричних спостережень можна отримати інформацію про вигляд супутника і дані про форму та стан об'єкта. На даний час фотометричні спостереження низькоорбітальних штучних космічних об'єктів ведуться за допомогою об'єктива діаметром 10 см, встановленого на гідуюальному монтуванні телескопа ТПЛ-1М (рис. 2). Така система дозволяє отримати криві блиску штучних космічних об'єктів у режимі стеження. Криві блиску у смугах системи BVR визначаються з похибкою  $0.05^m$ , а положення — менш ніж  $5''$ .

Для визначення віддалі до об'єкта використовується лазерна локація супутників (ЛЛС) з метою уточнення позиційних даних. У АО такі спостереження виконує ЛЛС-станція, яка складається з 1-м телескопа ТПЛ-1М з імпуль-



Рис. 1. Телескоп для позиційних спостережень: фотооб'єктив «Юпітер-9» діаметром 85 мм на гідуюальному монтуванні Meade DS2130

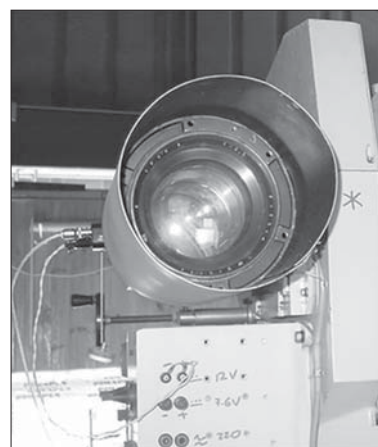


Рис. 2. Телескоп для фотометричних спостережень низькоорбітальних КО: об'єктив «Уран-9» встановлений на гідуюальному монтуванні ТПЛ-1М

сним лазерним передавачем SL212 (потужність 100 мДж, часове розділення 150 пс) та прецизійним таймером подій ComTiS (похибка не більше ніж 40 пс). Станція лазерно-локаційних спостережень вимірює віддалі до супутників, обладнаних кутиковими відбивачами, із точністю одиничного пострілу 10 см. [6]. Таймер подій ComTiS було використано для вивчення часових затримок реєстрації відеосигналу у фотометрії низькоорбітальних супутників [7].

Окремою групою стоять телескопи для спостереження за об'єктами на геостационарній ор-



Рис. 3. Оновлений телескоп АЗТ-14 із сучасною приймальною системою

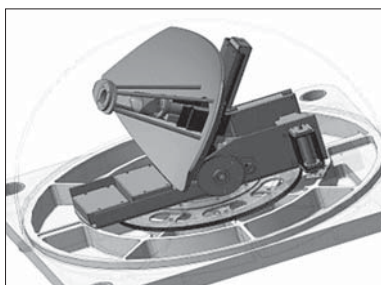


Рис. 4. Радіопеленгатор діапазону Ku (10.7...12.75 ГГц)

біті. Це телескоп АЗТ-14 ( $D = 480$  мм), з астрокамерою Xpress SX-35 і фільтрами Astrodon UBVR1 (рис. 3), а також телескоп GLD-250 ( $D = 250$  мм) з астрокамерою Starlight Xpress SXV-M9 і фільтрами Astrodon BVR. За допомогою цих телескопів проводяться позиційні і фотометричні спостереження геостационарних об'єктів. Криві блиску реєструються з похибкою не більше  $0.05^m$ .

В АО розроблено та виготовлено оригінальний пристрій для визначення кутового положення геостационарного супутника у геодезичній системі координат WGS84 та знаходження азимута об'єкта, на якому встановлений радіопеленгатор (рис. 4). Стандартний супутниковий конвертер (LNB) діапазону Ku (10.7...12.75 ГГц) встановлений у фокусі параболічної антени, яка повертається за азимутом на  $360^\circ$  та по висоті від  $0$  до  $60^\circ$  за допомогою позиційного механізму з точністю наведення  $0.01^\circ$ . Амплітуда широкомугового сигналу діапазону Ku, що його випро-

мінюють геостационарні супутники, оцифровується та записується. Далі програма аналізує записану інформацію та порівнює її з моделлю, розрахованою з відомих ефемерид одного або кількох геостационарних супутників. В результаті аналізу можливе знаходження кутового положення геостационарного супутника при відомому азимуті встановлення пеленгатора (пряма задача) або знаходження азимута встановлення пеленгатора при відомих ефемеридах одного чи кількох супутників (обернена задача). Точність визначення кутового положення геостационарного супутника  $0.05^\circ$ .

Перевагою радіоспостережень є їхня незалежність від погоди та цілодобовість.

Для кожного з методів спостереження і для кожного телескопа чи комплексу апаратури в цілому є своє специфічне програмне забезпечення. Це, по-перше, програми для підготовки до спостережень — визначення об'єкта, його орбітальних даних, приблизна оцінка блиску та інше. Другу групу програм складають процедури проведення спостережень проходження — гідкування, реєстрація, запис даних в комп'ютер. Третя група — це програми попередньої обробки та передачі на зберігання. Більшість з цих програм було розроблено та впроваджено в дію співробітниками АО.

#### РЕЗУЛЬТАТИ, ОТРИМАНІ У 2020–2021 РОКАХ

Результатом перших пробних спостережень у кампанії IADC (Inter Agency Debris Committee) у співпраці із НЦУВКЗ (Національний центр управління та випробувань космічних засобів) стала крива блиску китайської ракети-носія 40879 (CZ-4C R/B) (рис. 5, а). У рамках програми УМОС (Українська мережа оптичних станцій) отримано криві блиску супутника Топек (рис. 5, б) [4].

Кількість отриманих результатів за рік залежить від багатьох факторів, у першу чергу — від погодних умов, тобто від кількості ясних ночей. У Львові середнє число ясних ночей становить 100...150. На рис. 6 показано кількість спостережень за 2021 р. Для різних штучних космічних об'єктів (номери під стовпцями).



## БАНК ДАНИХ

Велика кількість результатів спостережень, які зібрано у АО, зумовила необхідність створення банку даних у форматі «сховища даних». В АО, на основі попереднього досвіду із супроводу бази даних ЛЛС-спостережень [2], реалізовано впорядкування, збереження та відображення різнотипних даних із акцентом власне на результати спостережень.

Основою будь-якого сховища даних є текстова та/або графічна (бінарна) інформація, яка зберігається у звичайних файлах або у складніших структурах, наприклад у таблицях баз даних. Наступним кроком для організації повноцінного сховища даних є вибір програмного забезпечення для гнучкого відображення різнотипних даних (файли текстові і бінарні, таблиці баз даних тощо). В АО для цього було вибрано “Tiki Wiki CMS Groupware” — це вільна багато-

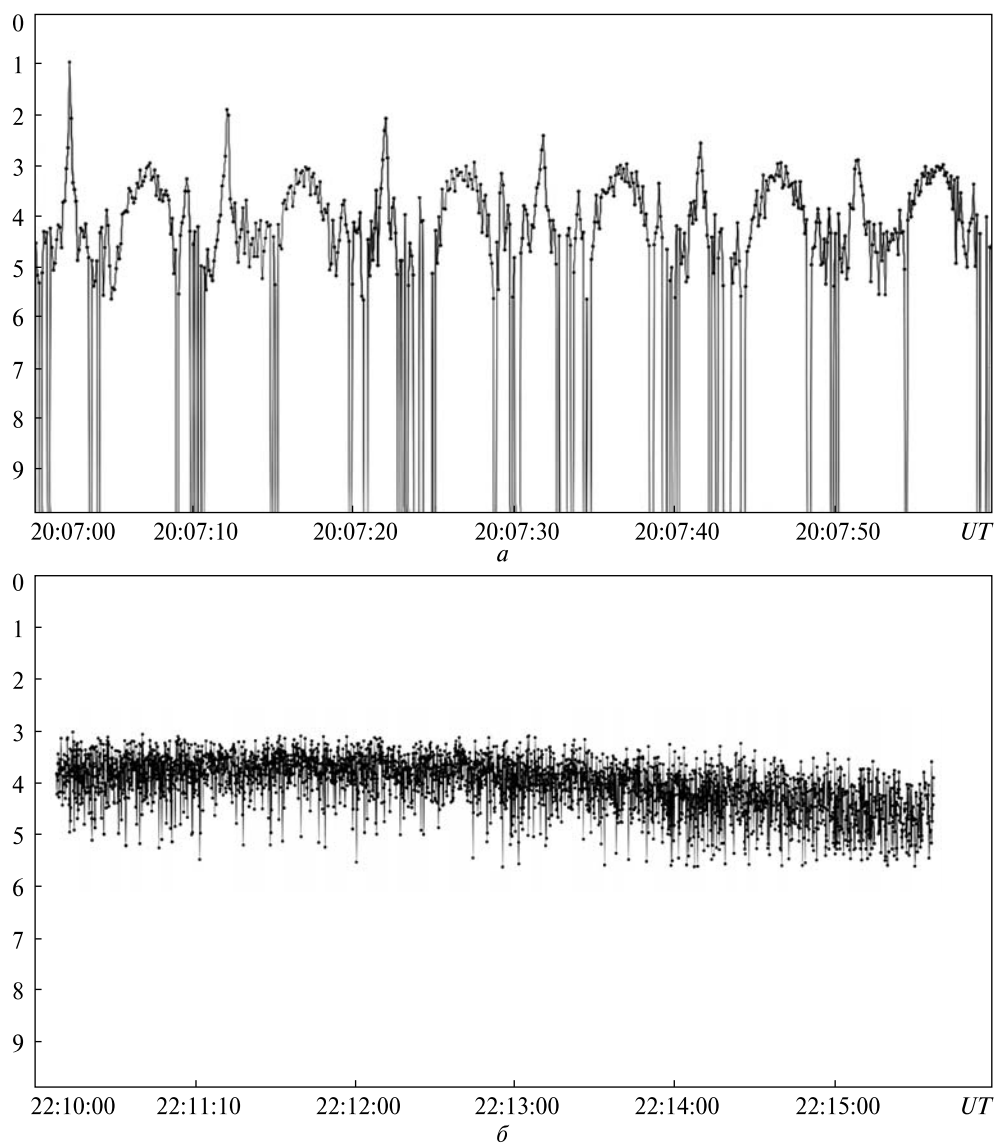


Рис. 5. Криві блиску: *a* — об'єкта 40879 (CZ-4C R/B), *б* — супутника Топекс 22076

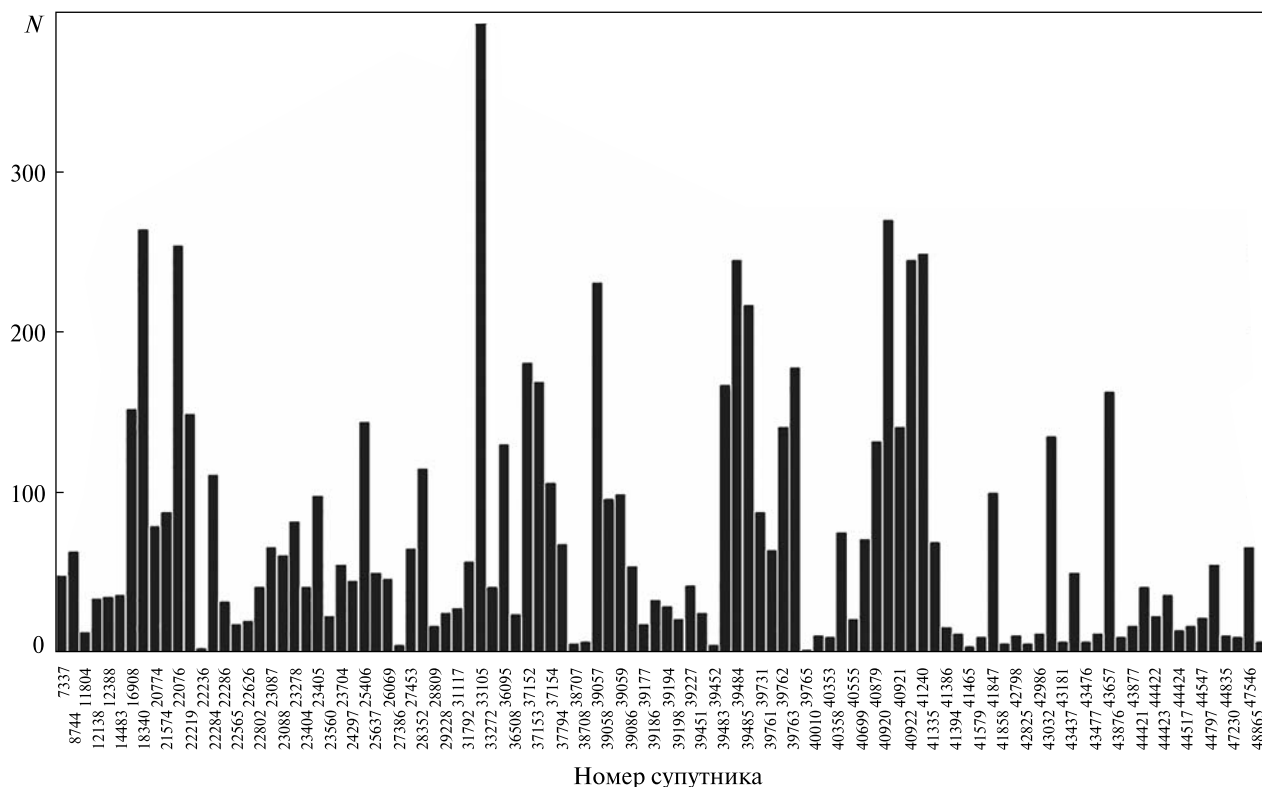


Рис. 6. Кількість оцінок координат різних штучних космічних об’єктів у екваторіальній системі (2021 рік, з січня по жовтень)

платформна система керування контентом, на основі PHP, яка підтримує роботу із базами даних MySQL. Таким чином, підібравши необхідні програмні рішення, було організовано пробну реалізацію повноцінного сховища даних спостережень штучних супутників Землі. На даний час триває наповнення банку даних.

### ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Слід відзначити, що АО була однією з засновників і досі є активним членом УМОС, виконує позиційні і фотометричні спостереження згідно із списком УМОС, а отримані результати надає у вільний доступ для всіх членів мережі [4, 5].

Крім того, результати спостережень надаються Національному центру управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ) згідно із запитом.

### ВИСНОВОК

Протягом більш ніж 60 років робіт зі спостережень штучних космічних об’єктів в АО було створено комплекс апаратури для такого роду робіт, накопичено значну кількість результатів спостережень. Ефективних результатів методом оптичного спостереження можна досягти лише у співпраці з іншими пунктами спостережень. Львівська АО продовжує розвивати астрономічне обладнання для спостережень, створювати програмне забезпечення, а також досліджувати параметри космічної погоди, зокрема вплив сонячної активності на рух штучних космічних об’єктів [8].

*Спостереження в рамках діяльності мережі УМОС проведено за часткової фінансової підтримки Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.*

ЛІТЕРАТУРА

1. Апунович С. В., Благодир Я., Вовчик Є. *Відділ практичної астрономії та фізики ближнього космосу*. Історія астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. За ред. Б. С. Новосядлого. Львів: Львівський нац. ун-т імені Івана Франка, 2011. С. 145—160.
2. Білінський А. Застосування скриптового програмування у LINUX для створення бази даних спостережень у АО ЛНУ. *Теор. електротехніка*: зб. наук. праць. 2010. Вип. 61. С. 82—89.
3. Епишев В. П., Исак И. И., Кудак В. И. та ін. Результаты исследований поведения на орбите ИСЗ в нештатном режиме под воздействием околоземного космического пространства. *Космична наука і технологія*. 2012. **18** (1). С. 60—67.
4. УМОС — Українська мережа оптичних станцій для дослідження навколосезного космічного простору: Каталог. URL: <http://mao.uran.ua/umos/index.php?slab=slabid-12> (дата звернення 09.10.2021).
5. Шулга О. В., Кравчук С. Г., Сибірякова Є. С. та інші. Розвиток української мережі оптичних станцій УМОС як складового елементу системи контролю навколосезного космічного простору. *Космична наука і технологія*. 2015. **21**(3). Р. 74—81.
6. Blagodyr Ja., Bilinsky A., Martynyuk-Lototsky K., et al. Overview and performance of the Ukrainian SLR station “Lviv-1831”. *Artificial Satellites*. 2007. **42**, No. 1. С. 9—15.
7. Koshkin N., Shakun L., Melikyants S., et al. Simultaneous multi-site photometry of LEO satellites to characterise their rotation states. *Odessa Astron. Pubs*. 2020. **33**. Р. 119—124. DOI: 10.18524/1810-4215.2020.33.216464
8. Koval'chuk M. M., Hirnyak M. B., Baran O. A., et al. Investigation of heliogeoaactivity impact on the dynamics of orbital parameters of Earth's artificial satellites. I. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2017. **33**. Р. 245—249. URL: <https://doi.org/10.3103/S0884591317050038> (дата звернення 09.10.2021).
9. Orbital Debris Quarterly News by NASA. Vol/=25.iss.3. September 2021. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i3.pdf> (дата звернення 09.10.2021).

REFERENCES

1. Apunevych S. V., Blagodyr J., Vovchik E. (2011). Department of Practical Astronomy and Near Space Physicists. History of the Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv. Ed. B. S. Novosiadlyi. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 145—160.
2. Bilinsky A. (2010). Application of script programming in LINUX to create a database of observations in LNU. Theoretical electrical engineering: a collection of scientific papers. Lviv: LNU Publishing Center. I. Franko, No. 61. 82—89.
3. Epishev V. P., Isak I. I., Kudak V. I., et al. (2012). The results of studies of the behavior in the orbit of satellites in the abnormal mode under the influence of near-Earth space. *Space Science and Technology*, **18** (1), 60—67.
4. UMOS — Ukrainian network of optical stations for the study of near-Earth space: Catalog. URL: <http://mao.uran.ua/umos/index.php?slab=slabid-12> (Last accessed 09.10.2021).
5. Shulga O. V., Kravchuk S. G., Sibiryakova E. S., et al. (2015). Development of the Ukrainian network of optical stations as a component of the control system of near-Earth space. *Space Science and Technology*, **21** (3), 74—81.
6. Blagodyr Ja., Bilinsky A., Martynyuk-Lototsky K., et al. (2007). Overview and performance of the Ukrainian SLR station “Lviv-1831”. *Artificial Satellites*, **42**, No. 1, 9—15.
7. Koshkin N., Shakun L., Melikyants S., et al. (2020). Simultaneous multi-site photometry of LEO satellites to characterise their rotation states. *Odessa Astron. Pubs*, **33**, 119—124. DOI: 10.18524/1810-4215.2020.33.216464
8. Koval'chuk M. M., Hirnyak M. B., Baran O. A. et al. (2017). Investigation of heliogeoaactivity impact on the dynamics of orbital parameters of Earth's artificial satellites. I. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, **33**, 245—249. URL: <https://doi.org/10.3103/S0884591317050038> (Last accessed 09.10.2021).
9. Orbital Debris Quarterly News by NASA. Vol/=25.iss.3. September 2021. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i3.pdf> (Last accessed 09.10.2021).

Стаття надійшла до редакції 20.11.2021  
 Після доопрацювання 12.02.2022  
 Прийнято до друку 20.04.2022

Received 20.11.2021  
 Revised 12.02.2022  
 Accepted 20.04.2022

*Ye. B. Vovchyk*, Leading Engineer, Ph.D. in Tech.

E-mail: [evavovchyk@ukr.net](mailto:evavovchyk@ukr.net)

*A. I. Bilinsky*, Leading Engineer

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3647-9346>

E-mail: [slr1831@ukr.net](mailto:slr1831@ukr.net)

*K. P. Martynyuk-Lototskyu*, Engineer

E-mail: [langurek@gmail.com](mailto:langurek@gmail.com)

*N. V. Virun*, Leading Engineer

E-mail: [n.virun@gmail.com](mailto:n.virun@gmail.com)

*I. Ya. Pidsryhach*, Head of Department

E-mail: [ipid@email.ua](mailto:ipid@email.ua)

*R. T. Nohach*, Leading Engineer

E-mail: [rtnohach@gmail.com](mailto:rtnohach@gmail.com)

Astronomical observatory of Ivan Franko National University of Lviv

8, Cyryl and Mefodij St., Lviv, 79005, Ukraine

#### OPTICAL OBSERVATIONS OF THE ARTIFICIAL OBJECTS IN LVIV ASTRONOMICAL OBSERVATORY

Space debris is becoming an increasing threat to near space services, including satellite communications, the launching of new satellites, as well as navigation and timekeeping programs. It affects even observations of the Earth. As space around us becomes more congested, the need to track space objects and provide information about space activities is becoming increasingly critical and urgent in helping to prevent collisions or damage caused by space debris.

Among the methods of tracking artificial objects are optical methods, which can provide information about the position of the selected object (positional observations), distance to the object (laser observations), as well as about the behavior of the object in orbit and its shape (photometric observations). The Astronomical Observatory of Lviv National University is equipped with a special hardware complex and software for the implementation of observations of artificial objects and can provide relevant information.

**Keywords:** space debris, artificial space objects, optical observations, photometric observations, laser observations.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.061>  
УДК 001(091)"1823/1913" (Уоллес)

**О. Я. ПИЛИПЧУК**<sup>1</sup>, зав. кафедри, д-р біол. наук, професор  
E-mail: olegpilipchuk47@gmail.com

**О. Г. СТРЕЛКО**<sup>1</sup>, професор, д-р іст. наук, професор  
E-mail: olehstrelko@gmail.com

**А. А. КОРОБЧЕНКО**<sup>2</sup>, професор, д-р іст. наук, професор  
E-mail: angelinakorobchenko@gmail.com

**О. О. ПИЛИПЧУК**<sup>1</sup>, доцент, д-р іст. наук, доцент  
E-mail: oksanapilipchuk78@gmail.com

<sup>1</sup> Державний університет інфраструктури та технологій  
вул. Кирилівська 9, Київ, Україна, 04071

<sup>3</sup> Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького  
вул. Гетьманська 20, Мелітополь, Запорізька область, 72300

## АЛЬФРЕД РАССЕЛ УОЛЛЕС ПРО ГАРМОНІЮ У ВСЕСВІТІ (До 120-річчя його праці «Місце людини у Всесвіті»)

*Ідея єдності людини і Всесвіту розроблялася в багатьох філософських і релігійних вченнях. Проте першим її науково обґрунтувати спробував Альфред Рассел Уоллес (1823—1913) — британський натураліст, мандрівник, географ, біолог і антрополог XIX століття. Він зауважував, що думка про «множинність світів» Коперника, де Земля є однією з численних планет, яка населена розумними істотами, не підкріплена спостереженнями. Уоллес доводив, що можливість виникнення у Всесвіті життя й розуму залежить від багатьох взаємопов'язаних умов. Він дійшов висновку, що «будь-яка інша планета в Сонячній системі, крім нашої Землі, не населена» і «майже настільки ж ймовірно, що ніяке інше Сонце не має заселених планет». Уоллес дотримувався думки, що люди — єдині розумні істоти і могли виникнути виключно на Землі як вершина еволюції Всесвіту. Дослідник допускав можливість існування інших світів з іншими фізичними законами, однак вважав, що лише в нашому могла з'явитися людина і саме для цього виник наш Всесвіт.*

**Ключові слова:** Всесвіт, еволюція, А. Р. Уоллес, планети, зоряний світ.

### ВСТУП

Ім'я видатного англійського дослідника природи Альфреда Рассела Уоллеса відоме сьогодні кожному натуралісту. Основоположник нових наукових дисциплін і напрямів — зоогеографії, еволюційного вчення, біогеографії, антропології, астробіології, космології. Особливо він відомий тим, що незалежно від Ч. Дарвіна розробляв теорію еволюції. У 1858 р. А. Р. Уоллес надіслав Ч. Дарвіну рукопис своєї статті «Про устремління різновидів нескінченно віддалятися від первісного типу». У ній він виклав ідеї, які збігались з теорією природного добору Ч. Дарвіна, над якою той працював вже понад 20 років. Це змусило Дарвіна швидко опублікувати свою працю

мий тим, що незалежно від Ч. Дарвіна розробляв теорію еволюції. У 1858 р. А. Р. Уоллес надіслав Ч. Дарвіну рукопис своєї статті «Про устремління різновидів нескінченно віддалятися від первісного типу». У ній він виклав ідеї, які збігались з теорією природного добору Ч. Дарвіна, над якою той працював вже понад 20 років. Це змусило Дарвіна швидко опублікувати свою працю

Цитування: Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Коробченко А. А., Пилипчук О. О. Альфред Рассел Уоллес про гармонію у Всесвіті (До 120-річчя його праці «Місце людини у Всесвіті»). *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 61—68. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.061>

«Походження видів шляхом природного добору» (1859).

А. Р. Уоллес здійснив ґрунтовні польові дослідження природи: спочатку у басейні річки Амазонки, а згодом і на Малайському архіпелазі, розташованому між Південно-Східною Азією (півостровом Індокитай) та Австралією. Архіпелаг складається з приблизно 20 тисяч островів загальною площею близько 2 млн км<sup>2</sup> та розділяє Індійський і Тихий океани. Це найбільший у світі архіпелаг, на якому розташовані такі країни, як Індонезія, Філіппіни, Сінгапур, Бруней, малайські штати Саравак, Сабах і федеральна територія Лабуан, Східний Тимор та більша частина Папуа Нової Гвінеї. Вчений-мандрівник запропонував фауністичний поділ, який сьогодні називається «лінією Уоллеса». Він поділяє індонезійський архіпелаг на дві окремі частини: західну – в якій тварини в основному азійського походження, і східну частину, в якій відображена фауна Австралії.

Сьогодні А. Р. Уоллес вважається провідним експертом з географічного розподілу видів тварин. Тому його деколи величають «батьком біогеографії». Подорожуючи островами Малайського архіпелагу, він дійшов висновку про закономірності розподілу організмів в результаті діяльності природного добору [8]. Конкретизував концепцію «центрів походження», вважаючи, що *початок існування кожного виду збігається як за простором, так і за часом з життям раніше існуючого близького виду*. Поклавши в основу зоогеографічного районування орнітогеографічні області Ф. Склетера, створив схему зоогеографічного районування земної суші, яка зберігає своє значення до теперішнього часу. Для 6 зоогеографічних областей встановив 24 підобласті [3]. Вважав, що основні формоутворювальні процеси відбуваються на північних континентах, звідки молодші і просунуті форми тварин і рослин відтісняють давніших і архаїчних все далі на південь. Згодом ці уявлення вчений оформив в концепцію «відтіснених реліктів» [14].

Разом з цим він був одним з провідних еволюційних мислителів ХІХ ст. і зробив вагомий внесок у розвиток еволюційної теорії. Він вважається одним із першовідкривачів природного

добору. В даному контексті заслуговує на особливу увагу його концепція попереджувального забарвлення тварин (відома як «ефект Уоллеса» [9], його гіпотеза про те, як природний добір може сприяти видоутворенню за допомогою захоплення створення бар'єрів проти гібридизації [10].

А. Р. Уоллес також є одним з перших вчених, який серйозно досліджував питання про існування життя на Марсі. Його опис Марса у книзі «Місце людини у Всесвіті» був коротким, тому в 1907 р. Уоллес повернувся до цієї теми і опублікував книгу «Чи придатний Марс?» [11], критикуючи твердження Персіваля Лоуелла про те, що на Марсі існують марсіанські канали, побудовані розумними істотами. Уоллес провів ґрунтовні дослідження, проконсультувався з різними експертами і підготував власний науковий аналіз марсіанського клімату і атмосферних умов. Серед іншого, Уоллес вказав, що спектроскопічний аналіз не виявив ознак водяної пари в марсіанській атмосфері, що аналіз клімату Марса Лоуеллом був серйозно помилковим – адже він сильно переоцінював температуру поверхні, і цей низький атмосферний тиск зробив би рідку воду, не кажучи вже про зрошувальну систему, що нібито опоясує планету, неможливою. Річард Мілнер коментував: «Геніальний і ексцентричний еволюціоніст Альфред Рассел Уоллес ... ефективно розвінчав ілюзорну мережу марсіанських каналів Лоуелла». Спочатку Уоллес зацікавився цією темою, тому що його антропоцентрична філософія схилила його до думки, що людина є унікальною у Всесвіті.

Книга А. Р. Уоллеса «Місце людини у Всесвіті» (1903) була написана внаслідок того величезного інтересу, який виник в результаті появи його статті про Гармонію у Космосі відразу у кількох журналах. Рецензенти цих статей висловили побажання, що було б бажано на цю тему написати окрему книгу, у якій можна було б викласти повніше необхідні докази про місце людини у Всесвіті. Разом з цим до детального вивчення даного питання А. Уоллесом спричинилася його книга «Дивовижне століття» (1898), в якій він написав розділи, присвячені астрономічним досягненням [4].

Нарешті книга А. Р. Уоллеса «Місце людини у Всесвіті» була першою серйозною спробою біолога оцінити вірогідність існування життя на інших планетах. Він дійшов висновку, що Земля була єдиною планетою у Сонячній системі, яка могла підтримувати життя, головним чином тому, що це була планета, на якій вода могла існувати у рідкій фазі. Існування інших екзопланетних систем, як і інших галактик, у той час не було доведеним.

**Метою нашої статті** є вивчення світогляду А. Р. Уоллеса через аналіз його наукової праці «Місце людини у Всесвіті».

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Знайомство з тогочасною астрономічною літературою переконало Альфреда Уоллеса в тому, що майже усі природознавці, які займалися астрономічними проблемами, починаючи з Джона Гершеля і завершуючи професором Сімпсоном, визнавали незаперечним той факт, що наше Сонце розміщене у площині великого кільця Чумацького Шляху, і що крім цього воно перебуває дуже близько до центру цього кільця. Альфред Уоллес також переконався, що майже немає жодних доказів того, щоб за межами Чумацького Шляху існували будь-які зірки або туманності. Отже Чумацький Шлях в цьому напрямку, на думку вченого, був межею зоряного Всесвіту.

Звертаючись до Землі та інших планет Сонячної системи, Альфред Уоллес дійшов висновку про окремішність Землі і що, окрім Землі, жодна інша планета не є носієм органічного життя.

У передмові до своєї книги «Місце людини у Всесвіті» А. Р. Уоллес зазначає, що протягом багатьох років він, як природознавець, приділяв особливу увагу проблемі тривалості геологічних епох, а також дослідженню причин м'якості клімату і взагалі одноманітності умов, які панували протягом низки геологічних епох. А також повідомляє, що він давно стежив за працями стосовно питання про передбачуваність «множинності світів» і ознайомився з більшістю з них, він вже мав уявлення як поверхнево ставилися до цієї теми навіть найбільш талановиті вчені і письменники. І ця обставина ще більше спонукала його до збирання і зіставлення якомога повнішої

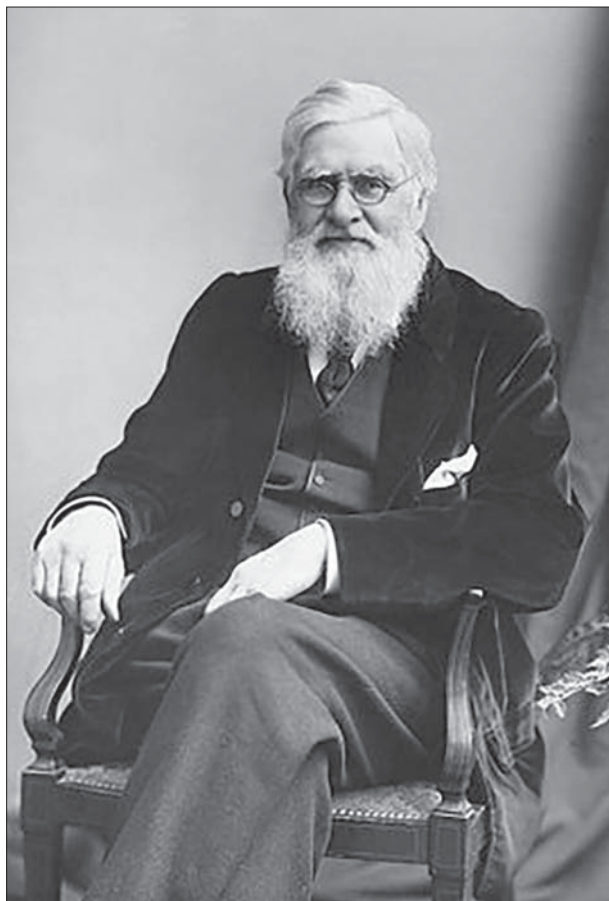


Рис. 1. Альфред Рассел Уоллес (1823—1913)

серії астрономічних, фізичних і біологічних доказів, які з упевненістю доводять факт існування життя у Всесвіті.

Результатом таких роздумів і стала поява книги А. Р. Уоллеса «Місце людини у Всесвіті». Ця праця побудована на вражаючих фактах і висновках «нової астрономії», а також на фактах і висновках фізиків, хіміків і біологів ХІХ — початку ХХ століть. Новизна і оригінальність даної праці А. Уоллеса полягає в тому, що вона поєднує в одне ціле висновки різних галузей науки, щоб показати їхнє ставлення до проблеми місця людини у Всесвіті [6].

А проблема ця полягає у питанні: існують чи не існують логічні наукові підстави вважати, що наша Земля є єдиною обжитою планетою і не тільки в Сонячній системі, а й в усьому Всесвіті?

Звичайно, зауважує А. Уоллес, це таке питання, яке вирішити з абсолютною достовірністю неможливо. Однак через відсутність прямих доказів зрозуміло, що ми поступаємо раціонально, звертаючись до ймовірності. А ці ймовірності повинні бути визначені не на підставі наших симпатій, а на основі абсолютно неупередженого і непередбаченого дослідження тенденції кожного доказу.

І далі А. Р. Уоллес зауважує, що оскільки його книга призначена для середньо освіченої публіки, і через те, що багато з його читачів можуть бути зовсім не знайомі з даним предметом і справді дивовижними успіхами сучасної науки, особливо тієї галузі, яку на межі тисячоліть називали Новою Астрономією, то автор книги вирішив спочатку дати популярний нарис тих її частин, які мають прямий стосунок до обговорення предмета. Цей нарис зайняв перші шість розділів книги.

З цього приводу він зауважує: «Ті з читачів, які достатньо знайомі з сучасною літературою з астрономії, можуть почати читання цієї книги з 7-го розділу, з якого починається виклад низки свідчень і аргументів, які автор міг виставити на розсуд читача» [6, С. 8].

А тих із читачів, які могли піддатися впливові критики з боку противників поглядів А. Р. Уоллеса, автор переконливо просить пам'ятати, що протягом всієї праці він спирався на авторитет кращих астрономів, математиків та інших науковців. І далі пише: «Все, що мені залишилося зробити в цій роботі – це звести разом різні факти і явища – або вказувати на ті висновки, які чітко випливали зі свідчень, добутих ними; стати третейським суддею при зіткненні двох різних думок або теорій; і, нарешті, – скомбінувати висновки різних, навіть віддалених одна від одної ділянок знання».

Зібравши разом багато фактів і аргументів, взятих з різних галузей науки, він по суті підбив їхні підсумки, зробив повне резюме і констатував свої власні остаточні висновки у вигляді 6 коротких положень.

Хочемо підкреслити, що А. Р. Уоллес розглянув проблему місця людини у Всесвіті з двох точок зору – матеріалістичної і спірітуалістичної.

Разом з цим він завершує свою працю декількома загальними роздумами з приводу майже важко уявлюваних проблем, що випливають з ідеї про «безмежність».

Як бачимо, А. Р. Уоллес у 1903 р., на порозі нового тисячоліття, вірив у вищі сили людського інтелекту – тобто у Бога. Але це не применшує важливості його праці, яка на той час була і цікавою, і повчальною. І сьогодні, з погляду сторічного проміжку часу, праця А. Р. Уоллеса не втратила свого значення і заслуговує на видання її в сучасній українській науково-популярній літературі.

Наведений в першій частині книги А. Р. Уоллеса короткий нарис відкриттів, здійснених астрономією його часу, дає певне уявлення про те, що вже було зроблено. Автор наводить відомості про цікаві проблеми, які на той час ще були не вирішені, а також підкреслює, що найбільш відомі астрономи з усього світу посилено працювали над розв'язанням цих проблем, – адже вирішення кожної з них є кроком вперед на шляху до більш повного знайомства зі Всесвітом в цілому. Їхня мета – створити таку систему зірок, яку створив Ч. Дарвін для органічного світу: відкрити удосконалений в небі процес змін і дізнатися про взаємозв'язки між таємничими туманностями, різними типами зірок і системами зірок. У пошуку Гармонії у Всесвіті астрономи мали надію вирішити проблему еволюції Сонця. Вони прагнули створити уявлення про те, яким чином увесь зоряний Всесвіт став таким, яким він є сьогодні.

Автор книги зазначає, що з даної теми написані цілі томи – яких тільки дотепних пропозицій і гіпотез не висувалося для вирішення різних питань стосовно гармонії у Всесвіті? Але труднощі, справді, були дуже значні: факти, в яких доводиться розбиратися, надзвичайно численні, і при всьому тому вони є лише незначним уривком від невідомого цілого. «І все ж в деяких відношеннях астрономи сьогодні дійшли певних висновків. Згідно з багатьма незалежними спостерігачами і мислителями стосовно основних принципів зоряної еволюції автор переконує нас, що ми хоча і повільно, але на чітко науковій основі просуваємося вперед до вирішення



цієї захоплюючої наукової проблеми, яку тільки прагне охопити наш розум», – писав вчений [6, С. 95].

І далі А. Р. Уоллес зазначає, що протягом другої половини ХІХ ст. астрономи дійшли висновку, що увесь Всесвіт, який складається із зірок і туманностей, становить одну складну і взаємно пов'язану систему, яка і створила Гармонію у Всесвіті. Звичайно, А. Уоллес образно, крок за кроком висвітлює питання єдності і еволюції зоряної системи. Окремий підрозділ своєї книги він присвячує питанню: «А чи зорі безкінечні?». Він на прикладах демонструє знання про Чумацький Шлях. Щоб зрозуміти факти, наведені в наступних підрозділах книги, А. Уоллес вдається до філософських трактувань Гармонії у Всесвіті. Він каже: «Першою людиною, яка показала істинне значення фактів щодо розподілу туманностей, був зовсім не астроном, а видатний філософ-природодослідник Герберт Спенсер. У своєму чудовому трактаті – «Гіпотеза туманностей» (1835) він підтримує той погляд, що туманності в дійсності є частиною Чумацького Шляху і нашого зоряного Всесвіту» [6, С. 97].

Роздуми про значення і роль туманностей привели А. Уоллеса до питання про одноманітність матерії та її законів, а відтак і до характеристики суттєвих ознак організмів [13]. Як біологу, йому було легко висвітлити питання про фізичні умови, необхідні у Всесвіті для життя. Ось чому автор цієї книги ґрунтовно розглянув питання «Земля та її стосунок до життя», «Атмосфера та її стосунок до життя». Все це настільки цікаво викладено автором, що виникає питання – хто він цей А. Уоллес, в чому його більше – науковець, письменник, популяризатор науки? Мабуть все разом. І хоча його аналіз про структуру Всесвіту сьогодні має для нас суто історичний інтерес, все ж він і цікавий, і повчальний.

Завершує свою книгу А. Уоллес розглядом питань: «А чи інші планети населені?», «Чи зорі мають свої планети?», «Чи корисні вони нам?» [13].

Останній розділ 16 книги підводить ризику під усім викладеним раніше і має назву «Стійкість зоряної системи», що є відповіддю на вирішення проблеми гармонії у Всесвіті. А. Уоллес підсумовує, що усі зібрані ним свідчення загалом

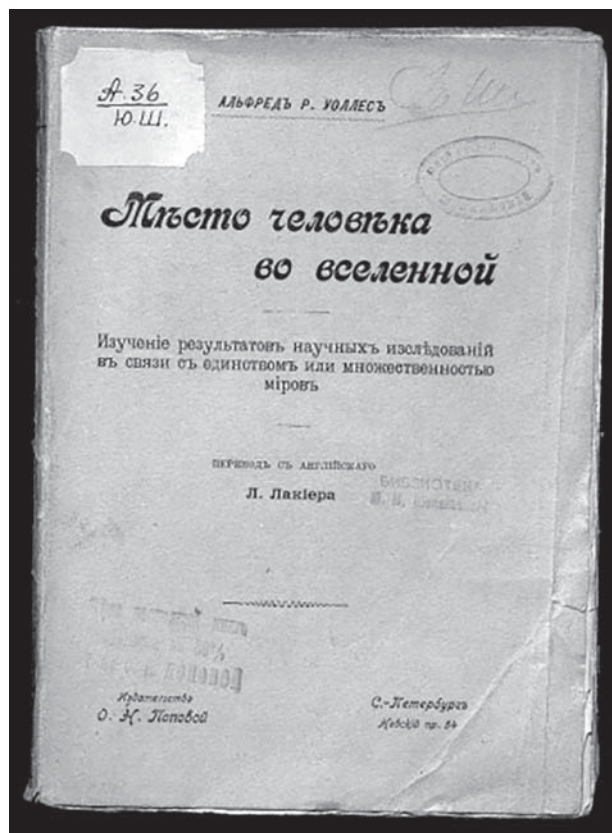


Рис. 2. Обкладинка книги А. Р. Уоллеса «Місце людини у Всесвіті», яка вийшла російською мовою у Санкт-Петербурзі у 1904 році

дозволяють зробити висновок, що наша Земля є єдиною населеною планетою в усій Сонячній системі. Що немає нічого дивного, чи невірогідного в тому світогляді, в усіх деталях пристосованого для розвитку органічного життя, а у вищих стадіях завершується появою людини. Автор стверджує, що людину створила Вища сила, і що ця людина вписується у складний сучасний Всесвіт [12].

## ВИСНОВКИ

Книгу А. Р. Уоллеса «Місце людини у Всесвіті» не оминули своєю увагою сучасні науковці. Вони показали її місце в сучасній картині Всесвіту. Так, В. В. Казютинський, спеціаліст у галузі філософських основ астрономії, космології і космонавтики, у своїй монографії «Людина в кон-

тексті універсального еволюціонізму» з'ясував, що висловлені А. Р. Уоллесом чіткі наукові формулювання про Гармонію у Всесвіті були сформульовані ним ще у далекому 1897 році [1]. Ці думки співзвучні з сучасними: *універсальним принципом еволюціонізму, антропним принципом і принципом доцільності*. Усі ці принципи чітко пов'язують історію природи і людську історію. Найбільш вагомим сьогодні вважають антропний принцип, який був сформульований лише у другій половині ХХ століття. Цей принцип фіксує наявність тісної залежності між фундаментальними властивостями Всесвіту і умовами для існування в ньому людини. В. В. Казютинський стверджує, що А. Р. Уоллес на певному етапі розвитку космогонії, а саме на межі тисячоліть, у 1903 р., вже обґрунтував основні наукові інтерпретації, які досі не застаріли.

Цікаво, однак, що ці ідеї А. Уоллеса до наших днів залишаються практично невідомими, про них не згадується навіть в найбільш фундаментальній монографії Барто і Тіплера (1986), присвяченій антропному принципу. А поміж цим аргументація А. Р. Уоллеса становить великий інтерес і сьогодні, оскільки вона була представлена ним в епоху класичної науки. Об'єктом уваги в далекий від нас час став зоряний Всесвіт, тобто Галактика, яка розглядалася з точки зору універсального еволюціонізму. Завдання науки в цій сфері, зі слів А. Уоллеса: «дати для зоряної системи те, що Ч. Дарвін дав для органічного світу» [6, с. 93]. А. Уоллес прагнув розкрити цілісні риси еволюційного процесу — власне цьому і присвячена його книга «Місце людини у Всесвіті».

На превеликий жаль, багато висновків, запропонованих А. Р. Уоллесом, давно забуті. Наприклад, відроджуючи антикоперніканський принцип, вчений-біолог вважав, що Земля (а разом з нею і Людина) посідає центральне місце у Всесвіті. Разом з цим інші ідеї Уоллеса набагато випередили свій час. Так, на основі аналізу сукупності відомих в його час наукових знань у сфері астрономії, космогонії і т. ін., А. Уоллес фіксує «зв'язок усіх важливих особливостей зоряного Всесвіту з успішним розвитком життя, вінцем якого є людина» [6, С. 278]. В цьому висловлюванні легко вбачається дорелятивістський про-

образ антропного принципу\*. А. Уоллес говорить про «великий і визначальний висновок», що «людина — це вінець свідомого органічного життя може розвинути тут, на Землі, тільки за наявності цього дивовижно матеріального Всесвіту, який оточує нас» [6, С. 286].

Якою є причина цієї узгодженості людини і Всесвіту? А. Уоллес прагне примирити дарвінізм і теологію. Він пише: «Якщо людина є єдиним і найвищим продуктом цього широкого Всесвіту, то варто зробити тільки ще один крок, щоб переконатися, що весь Всесвіт в дійсності явився з цією метою» [6, С. 287]. Тут доречно зауважити, що цільову причину А. Уоллес розуміє достатньо широко. Він включає у неї не тільки мету розгортання еволюційного процесу, а й його кульмінаційний пункт — виникнення людини. Окрім цього А. Р. Уоллес постійно підкреслює красу і Гармонію Всесвіту [5], що є для нього переконливим свідченням існування «Безкінечної істоти» (Бога). Це не що інше, як знаменитий «аргумент від задуму». Правда, А. Р. Уоллес допускає, що таке пояснення не є єдино можливим. Багато вчених, згідно з його слів, будуть пояснювати ті ж самі факти, які дозволяли А. Уоллесу вірити в трансцендентну (потойбічну) мету.

Завершити нашу статтю логічно словами В. В. Пазенка: «Повертаючись до з'ясування еволюції космологічного знання і його історії, зазначимо, що у кінці ХІХ — поч. ХХ-го століть спробу відродити «аристотелівсько-птолемеевську» по духу концепцію антропокосмізму зробив англійський дослідник природи, біолог, один із засновників зоогеографії Альфред Рассел Уоллес. Розробляючи спільно з Чарльзом Дарвіном теорію природного добору, А. Уоллес в книзі «Місце людини у Всесвіті» (СПб., 1904 р.) наполягає на правомірності твердження про «природність» космічних коренів еволюційного шляху людства» [2].

Ідея надприродної детермінації космогонічного процесу взагалі і космоантропологічного, зокрема, в наші дні досить популярна. Її підтри-

\* Релятивізм — методичний принцип, який полягає у метафізичній абсолютизації відносності і умовності змісту пізнання

мують, як це не здається парадоксальним, багато видатних вчених-природознавців. Проте серед вчених немало і таких, хто пропонує «гнучке» розуміння співвідношення надприродного початку світостворення і законів природи. Так, Стивен Хокінг, відомий англійський професор Кембріджського університету, член Національ-

ної академії наук США, книги якого розходяться мільйонними накладками, у своїй книзі «Вищий задум» висловив переконання в тому, що завдяки закону гравітації Всесвіт може і «створюватиме себе з нічого», його існування пояснюється «ми-мовільним рухом», суть якого розкриває «Теорія всього», чи (М-теорія) [7].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Казютинский В. В. *Человек в контексте универсального эволюционизма. Эволюция: От протозвезд к сингулярности*. Волгоград: Учитель, 2014. С. 20—48.
2. Пазенок В. В. Человек и Вселенная. К проблеме формирования личностно-мировозренческой картины мира. *Философия освіти*. 2013. № 2 (13). С. 282—316.
3. Пузанов И. И. *Альфред Уоллес, как ученый и путешественник*. Уоллес А. Р. Тропическая природа. Москва; Ленинград: Биомедгиз, 1936. С. 8—26.
4. Уоллес А. Р. *Чудесный век*. Изд. 2-е, испр. и доп. Санкт-Петербург: Изд-во Ф. Павленкова, 1904. 525 с.
5. Уоллес А. Р. *Научные и социальные исследования*. Т.1. *Изучение Земли: Описательная зоология. Распределение растений. Распространение животных. Теория эволюции. Астрономия. Специальные проблемы*. Санкт-Петербург: Ф. Павленков, 1903. 514 с.
6. Уоллес А. Р. *Место человека во Вселенной. Изучение результатов научных исследований в связи с единством или множественностью миров*. Санкт-Петербург: О. Н. Попова, 1904. 292 с.
7. Хокинг С., Млодинов Л. *Высший замысел*. Москва: Амфора, 2012. 208 с.
8. Wallace A. R. Man and Natural Selection. *Nature*. 1870. **3**, № 53. P. 8—9. <https://doi.org/10.1038/003008a0>.
9. Wallace A. R. Mimicry versus Hybridity. *Nature*. 1870. **3**, № 61. P. 165—166. <https://doi.org/10.1038/003165b0>.
10. Wallace A. R. Variation and Natural Selection. *Nature*. 1891. **44**, № 1144. P. 518—519. <https://doi.org/10.1038/044518b0>.
11. Wallace A. R. Чи придатний для життя Марс? Критичний огляд книги професора Персіваля Лоуелла «Марс і його канали» з альтернативним поясненням. Лондон, 1907. Macmillan & Co., Ltd. і Нью-Йорк: The Macmillan Co. URL: [http://wallace-online.org/converted/pdf/1907\\_Mars\\_S730.pdf](http://wallace-online.org/converted/pdf/1907_Mars_S730.pdf) (дата звернення 19.01.2022).
12. Wallace A. R. The Double Drift of Star Motion. *Nature*, 1907. **76**. P. 293—294.
13. Wyhe J. A delicate adjustment: Wallace and Bates on the Amazon and «the problem of the origin of species». *J. History of Biology*. 2014. **47**, № 4: P. 627—659. <https://doi.org/10.1007/s10739-014-9378-z>.
14. Wyhe J., Rookmaaker K. *Alfred Russel Wallace: Letters from the Malay Archipelago. Foreword by Sir David Attenborough*. Oxford: University Press, 2013. 304 p.

## REFERENCES

1. Kazyutinskiy V. V. (2014). *Man in the context of universal evolutionism. Evolution: From Protostars to Singularity*. Volgograd: Teacher, 20—48 [In Russian].
2. Pazenok V. V. (2013). Man and the Universe. On the problem of forming a personal worldview picture of the world. *Philosophy of enlightenment*, № 2 (13), 282—316 [In Russian].
3. Puzanov I. I. (1936). *Alfred Wallace as a scientist and traveler*. Wallace A. R. Tropical nature. Moscow; Leningrad: Biomedgiz, 8—26 [In Russian]
4. Wallace A. R. (1904). *A wonderful age*. Ed. 2nd, ref. and ext. St. Petersburg: F. Pavlenkov Publishing House, 525 p.
5. Wallace A. R. (1903). *Scientific and social research*. Vol. 1. *Exploring the Earth: Descriptive Zoology. Plant distribution. Distribution of animals. Evolution theory. Astronomy. special problems*. St. Petersburg: F. Pavlenkov, 514 p. [In Russian].
6. Wallace A. R. (1904). *Man's place in the universe. The study of the results of scientific research in connection with the unity or plurality of worlds*. St. Petersburg: O. N. Popov, 292 p. [In Russian]
7. Hoking S., Mlodinov L. (2012). *Supreme Intention*. Moscow: Amphora. 208 p. [In Russian].
8. Wallace A. R. (1870). Man and Natural Selection. *Nature*, **3**, № 53, 8—9. <https://doi.org/10.1038/003008a0>.
9. Wallace A. R. (1870). Mimicry versus Hybridity. *Nature*, **3**, № 61, 165—166. <https://doi.org/10.1038/003165b0>.
10. Wallace A. R. (1891). Variation and Natural Selection. *Nature*, **44**, № 1144, 518—519. <https://doi.org/10.1038/044518b0>.

11. Wallace A. R. (1907). *Does Mars fit for life? A critical review of Professor Percival Lowell's book «Mars and its Channels» with an alternative explanation*. London: Macmillan & Co., Ltd.; New York: The Macmillan Co. URL: [http://wallace-online.org/converted/pdf/1907\\_Mars\\_S730.pdf](http://wallace-online.org/converted/pdf/1907_Mars_S730.pdf) (Last accessed 19.01.2022).
12. Wallace A. R. (1907). The Double Drift of Star Motion. *Nature*, **76**, 293—294. <https://doi.org/10.1038/076293b0>
13. Wyhe J. (2014). A delicate adjustment: Wallace and Bates on the Amazon and «the problem of the origin of species». *J. History of Biology*, **47**, № 4, 627—659. <https://doi.org/10.1007/s10739-014-9378-z>.
14. Wyhe J., Rookmaaker K. (2013). *Alfred Russel Wallace: Letters from the Malay Archipelago. Foreword by Sir David Attenborough*. Oxford: University Press. Oct. 24. 304 p. (Illustrated Edition).

Стаття надійшла до редакції 19.01.2022

Після доопрацювання 25.04.2022

Прийнято до друку 26.04.2022

Received 19.01.2022

Revised 25.04.2022

Accepted 26.04.2022

О. Я. Пилипчук<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Biology, Professor, Head of the Department

E-mail: [olegpilipchuk47@gmail.com](mailto:olegpilipchuk47@gmail.com)

О. Г. Стрелко<sup>1</sup>, Dr. Sci. in History, Professor

E-mail: [olehstrelko@gmail.com](mailto:olehstrelko@gmail.com)

А. А. Коробченко<sup>2</sup>, Dr. Sci. in History, Professor

E-mail: [angelinakorobchenko@gmail.com](mailto:angelinakorobchenko@gmail.com)

О. О. Пилипчук<sup>1</sup>, Dr. Sci. in History, assistant professor

E-mail: [oksanapilipchuk78@gmail.com](mailto:oksanapilipchuk78@gmail.com)

<sup>1</sup> State University of infrastructure and Technologies

9 Kyrylivska St., Kyiv, 04071, Ukraine

<sup>2</sup> Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University

20 Hetmanska St., Melitopol, Zaporizhia region, 72300, Ukraine

#### ALFRED RUSSEL WALLACE ABOUT HARMONY IN THE UNIVERSE

(To the 120th anniversary of his work «Man's Place in the Universe»)

The idea of the unity of man and the Universe was developed in many philosophical and religious teachings. However, the first who scientifically substantiates it was Alfred Russel Wallace (1823—1913) — a British naturalist, traveler, geographer, biologist, and anthropologist of the XIX century. He noted that the idea of the «plurality of worlds» of Copernicus, where the Earth is one of the many planets inhabited by intelligent beings, is not supported by observations. Wallace substantiated that the possibility of the emergence of life and mind in the universe depends on many interrelated conditions. He concluded that «any planet in the solar system other than our Earth is uninhabited» and «almost as likely that no other Sun has inhabited planets». Wallace held the view that humans were the only intelligent beings and could have originated exclusively on Earth as the pinnacle of the evolution of the Universe. The researcher admitted the possibility of the existence of other worlds with other physical laws but believed that only in ours it was possible for a man to appear, and that is why our Universe arose.

**Keywords:** Universe, evolution, A. R. Wallace, planets, starry world.