

УДК 621.791.722

О. В. Карпович

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ОТРИМАННЯ БЕЗДЕФЕКТНИХ ЗВАРНИХ ТОВСТОСТІННИХ З'ЄДНАНЬ ЗІ СПЛАВУ ВТ22 ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Здійснено аналіз та дослідження дефектів у зварних товстостінних з'єднаннях зі сплаву ВТ22, отриманих електронно-променевим зварюванням за прийнятою технологією. Визначено, що основними дефектами є пори, порожнини та несплавлення в корені шва. Встановлено, що для отримання бездефектних з'єднань зі сплаву ВТ22 необхідно застосовувати спеціальні технологічні прийоми та забезпечити стабільність параметрів електронно-променевого зварювання у певному діапазоні.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, дефекти, міцність, ударна в'язкість.

Выполнен анализ и исследования дефектов в сварных толстостенных соединениях из сплава ВТ22, полученных электронно-лучевой сваркой по принятой технологии. Определено, что основными дефектами являются поры, полости и несплавления в корне шва. Установлено, что для получения бездефектных соединений из сплава ВТ22 необходимо применять специальные технологические приемы и обеспечить стабильность параметров электронно-лучевой сварки в определенном диапазоне.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, дефекты, прочность, ударная вязкость.

The analysis and research of defects in welded thick-walled joints made of ВТ22 alloy, obtained by electron-beam welding according to the adopted technology, is performed. It is determined that the main defects are pores, cavities, and non-melting in the root of the seam. It is established that to obtain defect-free compounds from ВТ22 alloy special technological methods must be used and stability of electron-beam welding parameters in a certain range should be ensured.

Keywords: electron-beam welding, defects, strength, toughness.

В авіаційній і ракетно-космічній техніці для виготовлення товстостінних конструкцій різного призначення найбільш перспективними є високолеговані термічно-зміцнювані титанові сплави, які дозволяють реалізувати найкраще поєднання фізико-механічних і конструктивних властивостей виробів. Однак зварювання таких сплавів істотно ускладнене у зв'язку з високою хімічною активністю титану за умов підвищених температур та особливостями структурних змін і фазових перетворень у шві і в зоні термічного впливу при зварювальному термічному циклі, що призводить до утворення крихких фаз і різного роду дефектів у з'єднанні [1–3].

Для отримання бездефектних зварних швів та високих показників міцності із збереженням задовільної ударної в'язкості необхідно постійно вдосконалювати технологічні процеси виготовлення зварних конструкцій з термічно-зміцнюваних титанових сплавів. Особливо це є важливим під час виготовлення великогабаритних товстостінних осесиметричних елементів конструкції ракетно-космічної та авіаційної техніки зі сплаву ВТ22, який має високі фізико-механічні властивості у деформованому стані, але і високий вміст β -стабілізаторів у кількості більше ніж 3 %, що призводить до виникнення шкідливих гартувальних явищ у металі зварного шва, утворення крихких фаз та інтерметалідів.

Найбільш перспективним способом отримання товстостінних зварних з'єднань з титанового сплаву VT22 є зварювання електронним променем. Цей спосіб відрізняється від дугових методів зварювання високою концентрацією енергії у зоні нагріву, високою проплавляючою здатністю і продуктивністю процесу.

В роботі [4], на основі експериментальних досліджень, встановлено, що у з'єднаннях титанових сплавів VT6ч и VT20, отриманих електронно-променевим зварюванням (ЕПЗ), із загального числа дефектів найбільшу кількість складають пори (близько 50 %), непровари (близько 19 %), несплавлення (близько 8 %) та підрізи (близько 1 %).

Основними причинами виникнення газових пор під час зварювання титанових сплавів є наявність забруднень і адсорбованої вологи на зварювальних поверхнях, наявність в основному металі газових домішок водню, кисню, азоту [4; 5]. Утворення порожнин у корні шва та інших дефектів залежить від стабільності технологічних параметрів зварювання. Для покращення якості зварного з'єднання пропонується велика кількість технологічних прийомів.

Найбільш вивчені з них при зварюванні однорідних матеріалів: формування шва з обов'язковим повним проплавленням, розгортка і нахил променя, модуляція струму пучка, застосування підкладок, виконання прихваток [6].

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що оптимальні режими зварювання і різні технологічні прийоми забезпечують найкращі умови кристалізації металу шва і дозволяють у зварних з'єднаннях титанових сплавів, одержуваних ЕПЗ, знизити кількість і розміри дефектів до рівня допустимих для даного типу зварної конструкції. Однак комплекс технологічних умов зварювання, що забезпечує отримання якісного зварного з'єднання, можна застосовувати тільки для конкретного титанового сплаву заданої товщини.

Метою цієї роботи є визначення технологічних умов отримання бездефектних зварних з'єднань зі сплаву VT22, отриманих ЕПЗ, для великогабаритних товстостінних осесиметричних елементів конструкції.

Методика проведення досліджень. Згідно з рекомендаціями до зварювання високоміцних титанових сплавів методом ЕПЗ, наведених у роботах [1; 4–7], зварювальні поверхні зразків оброблювалися до шорсткості не більше ніж 3,2 мкм, деталі зварювались без розділки кромки замковим з'єднанням або на технологічному кільці, під час зварювання використовувався розфокусований промінь зі скануючою коловою розгорткою, зварювання виконувалося у декілька проходів. Після зварювання зразки піддавалися відповідній термічній обробці.

Дослідження проводили на зразках-свідках у вигляді труб з титанового сплаву VT22, зварених ЕПЗ і термічно оброблених за прийнятою технологією. Розрізання циліндричних зразків виконувалося сегментами (рис. 1), які потім додатково механічно оброблювалися для дослідження характеристик металу шва, зони термічного впливу та основного металу.

Зразки для випробувань механічних властивостей на розтягнення виготовляли відповідно до ISO 6892-84. Хімічний склад матеріалу зразків після ЕПЗ та термообробки визначався спектральним та аналітичним методами.

Таблиця 1

Хімічний склад деталей з титанового сплаву BT22 після ЕПЗ

Хімічний склад зразків	Вміст елементів, %								
	C	Al	V	Mo	Fe	Si	Cr	Zr	Ti
	0,016	5,30	4,70	4,98	0,95	0,07	1,03	0,05	осн.
Вимоги ОСТ 1-90013-81	< 0,10	4,4–5,7	4,0–5,5	4,0–5,5	0,5–1,5	< 0,15	0,5–1,5	< 0,30	осн.

За результатами хімічного аналізу матеріал деталей відповідає сплаву BT22 згідно з ОСТ 1-90013-81. Вміст водню визначався методом плавлення в атмосфері інертного газу на установці «Лесо» RHEN602. Наявність дефектів у зварному з'єднанні визначали у виробничих умовах металографічним контролем, рентгеноконтролем шва та біляшовної зони, кольоровою дефектоскопією.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз результатів досліджень механічних властивостей зразків-свідків дозволив встановити, що тимчасовий опір на розтягнення та ударна в'язкість зварного шва і зони термічного впливу є більшими за 950 МПа та $2 \cdot 10^5$ Дж / м², що відповідає вимогам до високонавантажених титанових конструкцій (рис. 2). Вимірювання вмісту водню в матеріалі зразків-свідків виконувалось у зварному шві, біляшовній зоні та основному металі з обох боків від осі з'єднання. Отримані дані показали, що кількість водню на перевищує 0,015 %, вказаного у вимогах ОСТ1-90013-81 (рис. 3).

У зварному з'єднанні з титанового сплаву BT22, що отримано ЕПЗ із відповідною термообробкою, вміст домішок водню нижчий, ніж у основному металі (рис. 3), що пояснюється рафінацією металу під час багатопрхідного процесу зварювання. В результаті досліджень макро- та мікроструктури зразків-свідків встановлено, що зварне з'єднання деталей з титанового сплаву BT22 складається зі зварного шва, біляшовної зони та зони термічного впливу (рис. 4 а, б).

Величина макрозерна в зоні зварного шва відповідає 6 балу, а в біляшовній зоні – 5 балу, згідно з макроструктурами ВІАМ. Ширина зварного шва складає ≈ 5 мм, зона термічного впливу після термообробки – ≈ 45 мм.

В зоні зварного шва (рис. 4 в) мікроструктура матеріалу змінюється від 4 до 8 бала за інструкцією ВІАМ. Мікроструктура в зоні термічного впливу та основного металу відповідає 1(а) типу структур.

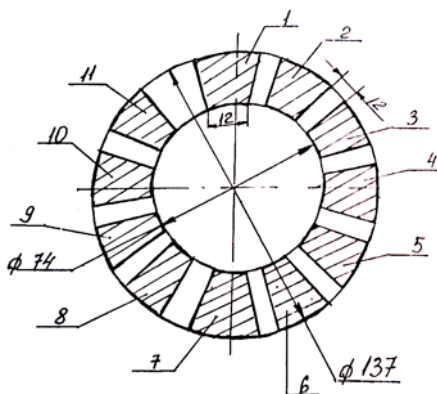
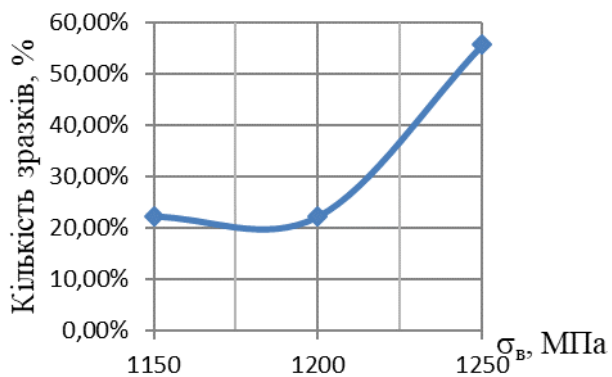
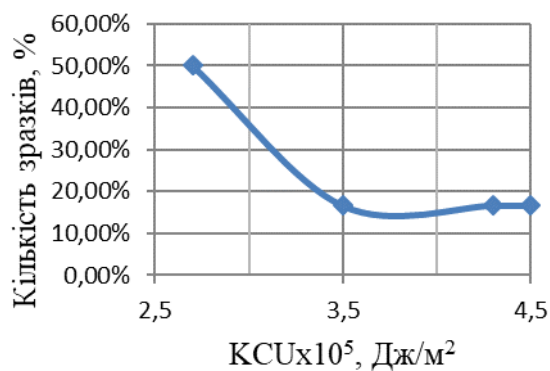


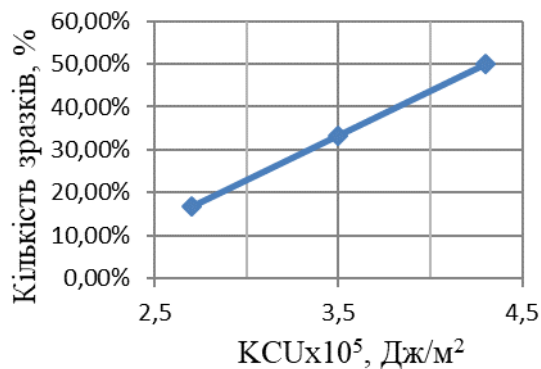
Рис. 1. Схема розрізання зразка-свідка



а



б



в

Рис. 2. Механічні властивості зварних з'єднань зі сплаву ВТ22 після ЕПЗ та термічної обробки:

а – тимчасовий опір на розтягнення, $\sigma_{\text{в}}$; б – ударна в'язкість у зварному шві;
в – ударна в'язкість у біляшовній зоні

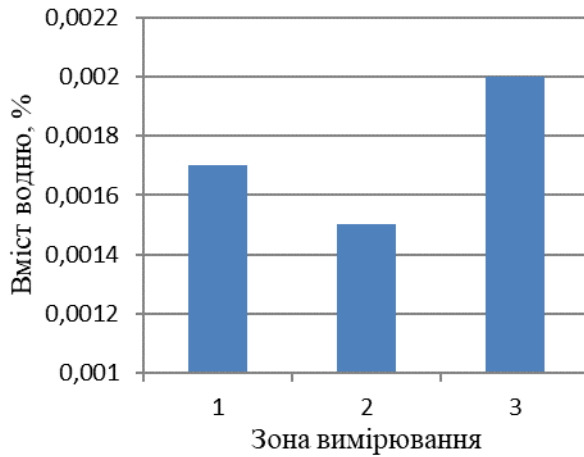


Рис. 3. Вміст водню:
1 – метал шва; 2 – біляшовна зона; 3 – основний метал

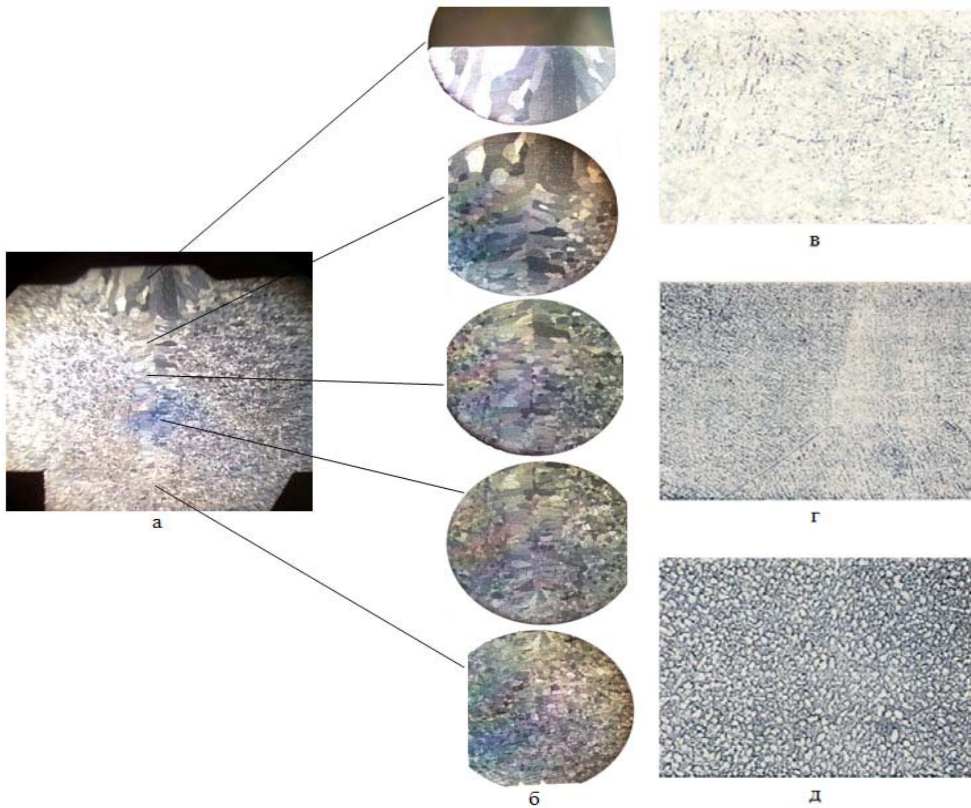


Рис. 4. Макро- та мікроструктура зварного з'єднання деталей з титанового сплаву ВТ22:
а – макроструктура зварного шва (x 3,6); б – макроструктура зварного шва по зонах (x 6,5); в, г, д – мікроструктура шва, зони термічного впливу та основного металу, відповідно (x 500)

На основі отриманих даних по розміру зерна та досліджень структури α - та β -фаз по зонах зварного з'єднання встановлено, що метал шва має пластинчасту структуру швидко охолодженого литого металу мартенситного типу (рис. 4 а). Форма зерна є різною в кожній зоні зварного з'єднання. Також у центрі шва (рис. 4 а, б) зазначено змінення орієнтації зерен під час кристалізації, що пов'язано з направленим швидким тепловідводом. В зоні термічного впливу (рис. 4 в) зерна мікроструктури мають витягнуту форму, орієнтовану в межах макрозерна, але є різноспрямованими у загальній структурі металу, що дозволяє отримати потрібний комплекс фізико-механічних властивостей зварного з'єднання з титанового сплаву ВТ22. Це пов'язано з особливостями технології термічної обробки зварного шва, яка складається з декількох етапів нагріву та охолодження. Аналіз макро- та мікроструктури групи зразків зварних з'єднань деталей зі сплаву ВТ22, отриманих за прийнятою технологією, не виявив пор, непроварів, несплавлень та підрізів. Але у поодиноких випадках у структурі зварного шва присутні пори, порожнини та несплавлення в корені шва (рис. 5), які можуть утворюватися внаслідок нестабільності потужності електронного променя, що призводить до переміщення рідкої фази в корінь шва та закриття парогазового каналу з утворенням порожнин, пор та інших дефектів у корені шва.

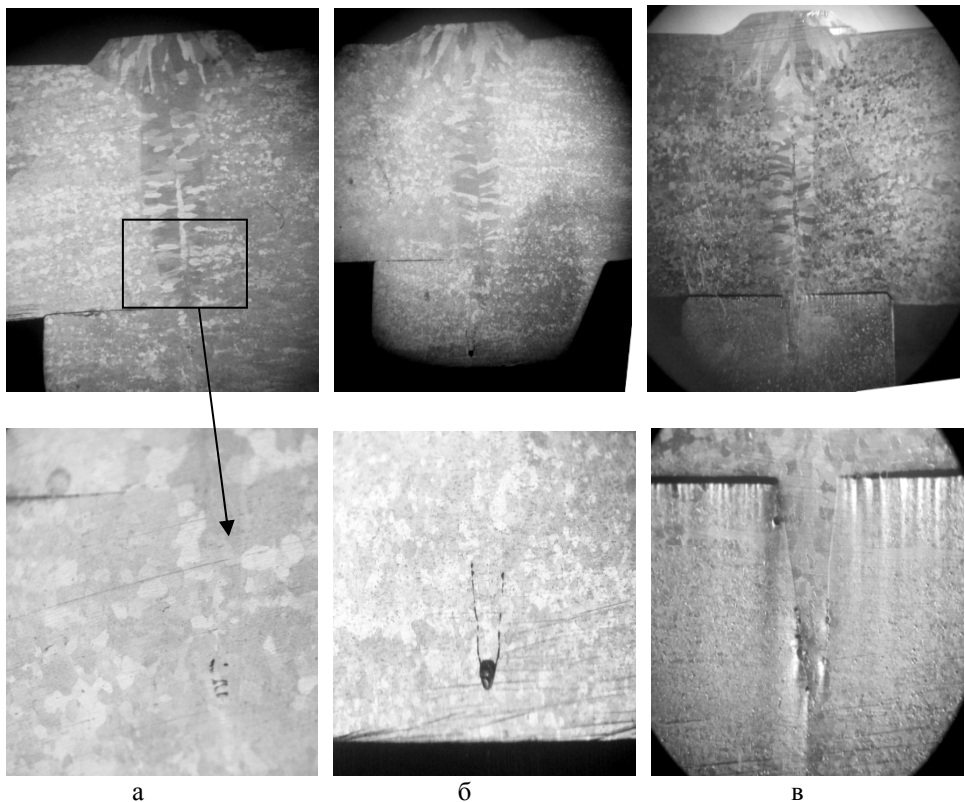


Рис. 5. Макроструктура зварного з'єднання деталей з титанового сплаву ВТ22 з дефектами в корені шва:
а – пори плоскі; б – несплавлення, порожнина; в – пори у вигляді дрібних бульбашок

Згідно з прийнятою технологією, зварювання циліндричних деталей відбувається з використанням технологічного підкладного кільця або замковим швом, що дозволяє вивести вказані кореневі дефекти у технологічну оснастку, яка видаляється у готовому виробі. Тобто вказані дефекти не впливають на якість з'єднання деталей та не знижують його експлуатаційні показники. Але під час великого діапазону змінення режимів зварювання положення, кількість та вид дефектів можуть бути непрогнозованими і призвести до їх появи у конструкційному з'єднанні та виробничому браку. В зв'язку з цим контроль та стабільність режимів ЕПЗ необхідно забезпечити у певному діапазоні параметрів, які забезпечать потрібні умови формування зварного з'єднання.

Відповідно до виробничих вимог, також виконано рентгеноконтроль і кольорову дефектоскопію шва та біляшовної зони, за якими дефектів не виявлено і якість зварного з'єднання відповідає вимогам конструкторської документації та керівному технічному матеріалу до ЕПЗ титанових сплавів.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено, що технологія виготовлення зварних великогабаритних товстостінних осесиметричних елементів конструкції ракетно-космічної та авіаційної техніки зі сплаву ВТ22 складається з ЕПЗ та відповідної термічної обробки зони з'єднання. ЕПЗ деталей вказаної форми виконується з використанням таких технологічних прийомів, як використання технологічного підкладного кільця, розфокусованого електронного променю зі скануючою коловою розгорткою, багатопрохідність процесу зварювання.

Для забезпечення під час ЕПЗ потрібних умов формування бездефектного зварного з'єднання деталей з титанового сплаву ВТ22 необхідно забезпечити стабільність параметрів у певному діапазоні, що дозволить прогнозувати виникнення та виведення можливих дефектів у технологічну оснастку та отримати мінімальну кількість виробничого браку.

Прийнята технологія дозволяє отримати бездефектні зварні з'єднання зі сплаву ВТ22 з такими характеристиками міцності: тимчасовий опір на розтягнення $\sigma_b > 950$ МПа; ударна в'язкість $a > 2 \cdot 10^5$ Дж / м², що відповідає вимогам до високонавантажених титанових конструкцій.

Бібліографічні посилання

1. **Гуревич С. М.** Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блащук и др. – 2-е изд., доп. и перераб. – К. : Наук. думка, 1986. – С. 240.

2. **Карпович Е. В.** Способы получения крупногабаритных осесимметричных изделий из высокопрочных титановых сплавов / Е. В. Карпович, В. Г. Бессалый // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. – Д. : Пороги, 2010. – Т. X. – С. 30–40. – ISBN 978-617-518-102-7.

3. **Ахонин С. В.** Свойства соединений высокопрочного титанового сплава Т110, выполненных сваркой плавлением / С. В. Ахонин, В. Ю. Белоус, С. Л. Антонюк и др. // Автоматическая сварка. – 2014. – № 1. – С. 54–57.

4. **Кузнецов А. А.** Формирование металла шва при электронно-лучевой сварке конструкций из титановых сплавов / А. А. Кузнецов, П. В. Череповский, В. И. Муравьев // Сварка и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 27–30. – ISSN 2071-5234.

5. **Назаренко О. К.** Электронно-лучевая сварка / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. ; под ред. Б. Е. Патона. – К. : Наукова думка, 1987. – 256 с.

6. Сварка. Резка. Контроль : справочник: в 2-х томах / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. – М. : Машиностроение, 2004. Т. 1 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков и др. – 624 с. – ISBN 5-217-03263-4 (Т. 1), ISBN 5-217-03262-6.

7. **Карпович Е. В.** Определение диаметра круговых колебаний электронного луча при сварке цилиндрических деталей из титановых сплавов / Е. В. Карпович, С. А. Чернецкий, Е. А. Джур, В. Г. Бессалый // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : зб. наук. пр. – Д. : Пороги, 2011. – Т. XI. – С. 79–88. – ISBN 978-617-518-167-6.

Надійшла до редколегії 27.06.2017

УДК 629.78

О. В. Луць, А. А. Манойленко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УГЛОВЫХ МАНЕВРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ СТЕРЕОСЪЕМКИ УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Предложена методика расчета параметров программного углового движения космического аппарата (КА) в трассовом стереоскопическом режиме съемки участков поверхности Земли, расположенных на заданном расстоянии от следа трассы КА.

Ключевые слова: космический аппарат, стереосъемка, угловое движение.

Запропоновано методику розрахунку параметрів програмного кутового руху космічного апарата (КА) в трасовому стереоскопічному режимі зйомки ділянок поверхні Землі, розташованих на заданій відстані від сліду траси КА.

Ключові слова: космічний апарат, стереозйомка, кутовий рух.

The method of calculating the parameters of the spacecraft angular motion while shooting the Earth's surface, located at a predetermined distance from the track satellites route, in stereoscopic mode.

Keywords: spacecraft, stereo imaging, angular motion.

Введение. При помощи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса можно решать ряд задач, например, определять высоты объектов, расположенных на Земле, по информации, полученной от КА. В этом случае обрабатывают снимки одного и того же участка поверхности Земли, полученные при его съемке под разными углами отклонения КА от направления в надири (стереопары).

Постановка задачи. Требуется получить математическую модель, по которой, задав необходимые исходные данные, можно рассчитать программные углы отклонений КА по тангажу, крену и рысканию, угловые скорости и угловые ускорения КА в этих каналах управления, обеспечивающие требуемый режим стереосъемки.

Исходные положения и допущения [3; 4]. При разработке методики расчета параметров программного углового движения КА вокруг центра масс учитывались следующие исходные положения и допущения:

– время отсчитывается от момента прохождения КА восходящего узла витка орбиты, на котором производится съемка;