

І.О. Гусарова, Т.А. Манько, О.Ф. Саленко

**ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ПАЯННЯ
ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОЗАХИСТНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ПОРОШКОВОГО
СПЛАВУ (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃**

Анотація. З застосуванням методики математичного планування експерименту за схемою ротатабельного центрального композиційного планування проведено вибір параметрів паяння зовнішньої панелі, опор та з'єднувальних елементів зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ для теплозахисної конструкції навітряної частини орбітального космічного літака. На основі проведеного чисельного експерименту показано, що найбільший вплив на величину межі міцності паяного з'єднання надає температура і зусилля притиснення. Достовірність розрахунків підтверджено складанням макету конструкції з використанням паяння.

Ключові слова: елементи зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃, режими паяння, планування експерименту, високотемпературне паяння в вакуумі.

Постановка проблеми. Успішна реалізація полетів в космос в Україні потребує створення багаторазових транспортно-космічних систем, які включають гіперзвукові літаки горизонтального старту. Це дозволяє сняти обмеження, що накладає відсутність космодромів у нашої державі, оскільки забезпечує виведення об'єктів на орбіти з будь-яким нахилом з власної території.

Досвід експлуатації орбітального космічного літака «Спейс-Шаттл» показав, що однією з головних проблем розробки гіперзвукових літальних апаратів є відсутність надійних теплозахисних конструкцій, що мають придатні габаритно-масові параметри, вартість і потрібний ресурс експлуатації.

Більш актуальним є теплозахист навітряної частини орбітального космічного літака, оскільки він складає практично половину площі його поверхні, має жорсткі масові обмеження та нагрівається до максимальних температур 1100 °С під час спуску в атмосфері Землі. Перспективною

є розробка багат шарової теплозахисної конструкції з зовнішньою тришаровою панеллю и внутрішньою теплоізоляцією [1-3].

Мета дослідження. Метою даної роботи є розробка питань складання теплозахисної конструкції орбітального космічного літака з зовнішньою панеллю, опорами та з'єднувальними елементами з жаростійкого жароміцного порошкового сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ високотемпературним паянням в вакуумі.

На рисунку 1 наведена схема проведення експериментально - теоретичних досліджень з метою вибору параметрів паяння конструкцій із сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃.



Рисунок 1 - Схема вибору параметрів паяння макета з тонкостінними металевими елементами

Викладення основного матеріалу дослідження. Експериментально - теоретичний вибір припою. Аналіз вибору матеріалів для паяння тонкостінних конструкцій зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ дозволив обрати для досліджень новий високотемпературний припій на основі нікелю ПЗ (Ni, 1,5% В, 5% W). Відпрацювання режимів проводили на пластинах зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ розміром 25x50 мм, товщиною 0,4 мм і 0,15 мм, за величини напустку 1,5-2 мм і площі контакту не менше за 10,0 мм². Перед паянням пластини механічно обробляли спеціальним інструментом для видалення оксидного шару та поверхневих забруднень.

Паяння проводили в вакуумі 10^{-3} Па в діапазоні температур 1250-1400 °С з витримкою протягом 15-20 хвилин і охолодженням до температури 40-50 °С. Тиск між зварювальними елементами становив $p = 0,1$ МПа. Проведені мікроструктурні дослідження довели, що при паянні в вакуумі зразків у діапазоні температур 1300-1370 °С між з'єднуваними поверхнями шва утворюється адгезійний прошарок, який має однорідну суцільну структуру, що задовольняє вимогам до з'єднань теплозахисних конструкцій (рис. 2).

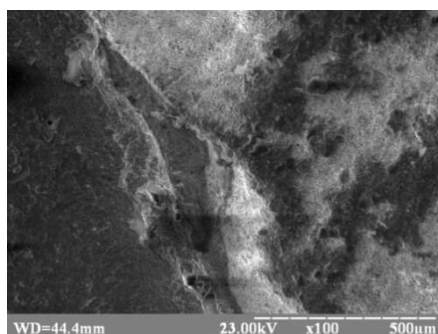


Рисунок 2 – Біляшовна зона зразка зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃

Показано, що за температури вищої за 1375°C спостерігається руйнування тонкої пластинки товщиною 0,15 мм. Застосування температури паяння 1250-1290 °С не є технологічним рішенням, оскільки в зоні напустку спостерігаються окремі конгломерати, а розтікання припою відсутнє.

Планування експерименту при дослідженні процесів паяння елементів теплозахисної конструкції. Для вибору режимів паяння необхідно визначити рівень кожного з чинників (температура паяння, тривалість витримки, зусилля притискання, геометричні параметри заготовки), що потребує великої кількості експериментів.

З метою мінімізації кількості проведених дослідів застосовували методику математичного планування експерименту за схемою ротатбельного центрального композиційного планування, в основі якої лежить регресійний аналіз, що включає метод найменших квадратів і статистичну обробку даних. Даний план дозволяє побудувати модель, яка з однаковою точністю пророкує значення відгуку в точках, рівновіддалених від центру плану, і з найбільшою точністю – у точках,

розташованих в його околиці. Така властивість моделі доцільна для досліджень процесу паяння поблизу номінального режиму, а також для оптимізації процесу за умови, що необхідний оптимум знаходиться не-далеко від центру плану.

При плануванні експерименту функцією відгуку є величина межі міцності (σ) і деформації (p) паяного з'єднання.

Математичну модель процесу паяння представили у вигляді двох рівнянь:

$$\sigma(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} x_i x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_j x_j^2 + \dots$$

$$p(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} x_i x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_j x_j^2 + \dots,$$

де x – прийняти фактори (t, τ, P, h).

Для виявлення впливу кожного з чотирьох керованих факторів вибрали інтервали їх варіювання, які охоплюють всі можливі варіанти (табл. 1). У таблиці нижній рівень позначений знаком «-1», верхній – знаком «+1».

Таблиця 1

Інтервали варіювання факторів

№ п/п	Назва факторів	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
		-1	+1	
1	t – температура пайки, °C	1200	1450	250
2	τ – тривалість витримки, хв	15	90	75
3	P – зусилля притискання,	0,1	1	0,9
4	МПа h – геометричні параметри заготовки, мм	0,1	1,5	1,4

У результаті розрахунків показано, що регресія побудована для рівня значущості $\alpha = 0,95$. Якість побудованої регресії вимірювали, спираючись на значення коефіцієнта детермінації R^2 як ступеня відповідності регресійній моделі до фактичних даних.

Отримано рівняння регресії:

– математична модель залежності величини межі міцності паяння від обраних чинників:

$$\sigma = -7200,61 + 5,63921 \cdot T - 815,557 \cdot P - 0,00395333 \cdot t^2 + 72,3526 \cdot h - 0,00453333 \cdot t \cdot T + 0,688889 \cdot t \cdot P + 1,55556 \cdot T \cdot P - 0,714286 \cdot T \cdot h + 91,2698 \cdot P \cdot h,$$

математична модель залежності величини деформації від обраних чинників:

$$\rho = 1,4518 - 0,00236514 \cdot t - 0,0333627 \cdot P + 0,270845 \cdot h - 0,00000133333 \cdot t \cdot T - 0,000228571 \cdot t \cdot h + 0,00000814815 \cdot T^2 + 0,00037037 \cdot T \cdot P + 0,0133745 \cdot P^2.$$

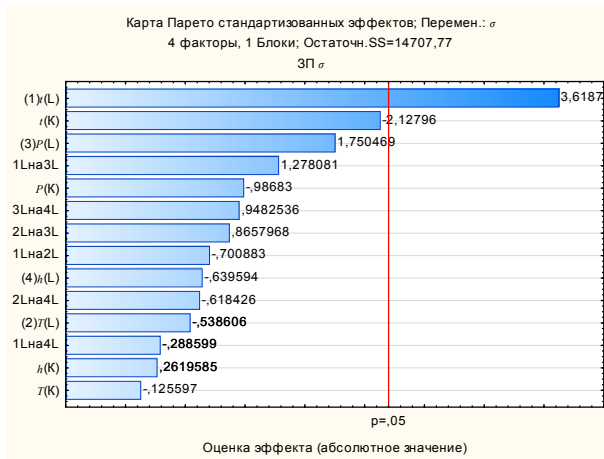
Отримані математичні моделі є адекватними. Коефіцієнти перед факторами вказують на значимість вхідних параметрів і вплив їх на досліджувані фактори, а також їх парну взаємодію на вихідну величину.

Дієвість моделі підтверджується високим коефіцієнтом детермінації R^2 , рівним 0,919475 для величини межі міцності паяння та 0,945494 – для величини деформації. Про те, що регресія високо значуща, свідчить значення критерію Фішера $F = 289,9131$ (межа міцності паяння) і $F = 13,24973$ (деформація) при рівні значущості $p < 0,0000$.

Так як регресивні моделі другого порядку дають багато інформації про вплив варійованих факторів і їх парну взаємодію на вихідну величину, ці моделі можна використовувати не тільки для оптимізації процесу паяння, а й для відшукування таких значень варійованих факторів всередині діапазону їх варіювання, для яких значення якісних і кількісних характеристик процесу паяння виявляються максимальними або мінімальними.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії, що адекватно описує залежність досліджуваної функції відгуку від обраних факторів. Вплив кожного з варійованих факторів графічно відображали у вигляді стандартизованої карти Парето (рис. 3).

Графічні поверхні відгуку зміни досліджуваних параметрів від факторів паяння при їх спільному впливі при різному поєднанні наведено на рис. 4.

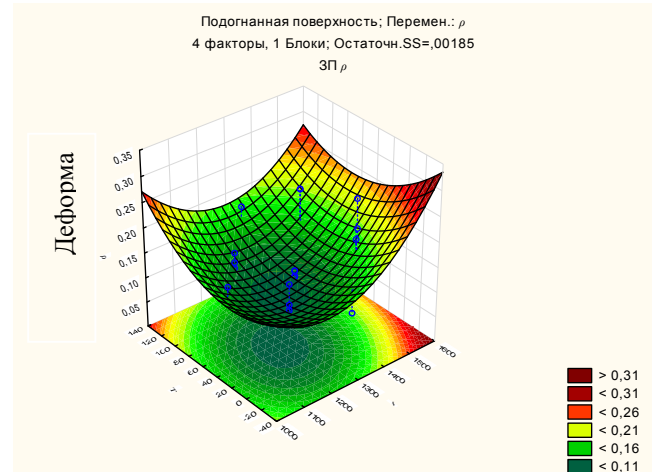
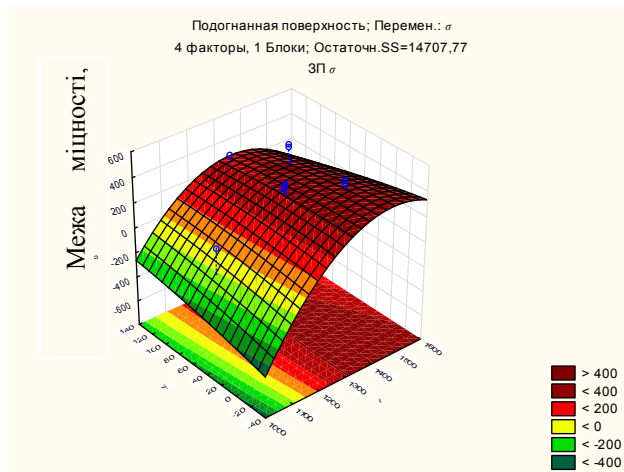


а – межа міцності паяного з'єднання

б – величина деформації

Рисунок 3 – Карта Парето регресійної моделі

На основі проведеного чисельного експерименту показано, що найбільший вплив на величину межі міцності паяного з'єднання надає температура і зусилля притиснення. Величина деформації в основному залежить від температури паяння і геометричних параметрів.



межа міцності паяння

величина деформації

Рисунок 4 – Залежність величини факторів від температури паяння і тривалості витримки

В результаті розробки технологічного процесу паяння за схемою планування експерименту у вигляді дрібних реплік встановлено, що температура паяння повинна складати 1350 °С, тривалість процесу 20 хвилин, тиск між зварювальними елементами не меншим за 0,1 МПа.

Найбільший вплив на якість шва і деформацію конструкції має температура паяння.

Аналітичне моделювання теплових полів. Рівномірність розподілу температур по довжині шва досліджували моделюванням нагрівання пластини зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ з використанням аналітичних методів. На основі проведених розрахунків показана доцільність встановлення захисних екранів в зоні обробки з метою більш рівномірного розподілу температур по всій поверхні з'єднувальних заготовок під час паяння [4].

Експериментальна перевірка правильності обраних рішень. Перевірку правильності теоретичних розрахунків проведено напустковим паянням пластин розміром 25x50 мм зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ товщиною 0,4 мм і 0,15 мм. Паяння проводили припоєм ПЗ, у вакуумі при температурі 1350 С протягом 20 хвилин. Якість шва контролювали за допомогою мікроструктурного аналізу.

За результатами проведених досліджень підтверджено необхідність для отримання якісного шва правильного геометричного стикування елементів перед паянням та забезпечення тиска між поверхнями не менш за 0,1 МПа.

Міцність паяного з'єднання досліджували шляхом силового навантаження зразків з'єднань пластин зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ товщиною 0,15 мм на розривній машині Р-10. Напруження у перетині розриву складає 320±10 МПа, руйнування відбулося не по шву, а по основному матеріалу. Міцність паяного з'єднання більше міцності сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃, що достатньо для застосування технології високо-температурного паяння в вакуумі з припоєм ПЗ для складання конструкції з тонкостінними металевими елементами.

На підставі проведених досліджень встановлено, що складання великогабаритних конструкцій теплозахисту орбітального космічного літака при температурі 1350 °С доцільно проводити з мінімальною (за можливістю однією) кількістю операцій. Режим технологічного циклу паяння порошковим припоєм ПЗ включає ступінчасте нагрівання до температури 1350±10 °С, у вакуумі 10⁻³ Па протягом 20 хвилин і охолод-

ження до температури 40-50 °С. Для запобігання деформації конструкції тиск між її елементами повинен складати не менше 0,1 МПа [4].

Виготовлення технологічного макета. Працездатність розробленої технології паяння теплозахисної конструкції оцінювали шляхом виготовлення і випробування в умовах, що імітують експлуатаційні, технологічного макета. Макет складається з чотирьох панелей розміром 144x144 мм, двох шарових U-образних профілів і однієї опори зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃, які з'єднано високотемпературним паянням за розробленою технологією. Під зовнішньою тришаровою панеллю встановлюється внутрішня теплоізоляція ВЛТІ товщиною 28 мм, що забезпечує захист силової оболонки БКА від перегріву.

Експериментальні дослідження працездатності макета теплозахисної конструкції з металевими комплектуючими зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)-Y₂O₃ у високотемпературному газовому потоці підтвердили доцільність вибору матеріалів і конструкції теплозахисту.

Висновки. З застосуванням математичного планування експерименту за схемою ротатабельного центрального композиційного планування представлено технологію складання тонкостінних елементів теплозахисної конструкції навітряної частини орбітального космічного літаку зі сплаву (Ni20Cr5,95Al)- Y₂O₃ високотемпературним паянням в вакуумі. Випробування в умовах, що імітують тепловий вплив при поверненні орбітального космічного літака в атмосфері Землі, підтвердили правильність вибору технологічних параметрів паяння.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Maiorova I.A. Optimal Thermal Design of Multishield Thermal Protection System of Reusable Space Vehicle / I.A. Maiorova, P.V. Prosuntsov, A.V. Zuev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics - Springer. US, - 2016. - Volume 89. - Issue 2, pp. 528-538. <https://doi.org/10.1007/s10981-016-1406-8>.
2. Qiuyi Xu. Thermomechanical Coupling Analysis and Optimization of Metallic Thermal Protection / Qiuyi Xu, Shu Li, Li Wang, Apeng Dong // J. Shock and Vibration – Hindawi, -2019. - Article ID-1890237. - Pp 1-15. <https://doi.org/10.1155/2019/1890237>.
3. Babaytsev A. Optimization of Thermal Protection Panels Subjected to Intense Heating and Mechanical Loading / A. Babaytsev, V. Dobryanskiy, Yu. Selyaev // 2019. – Springer, - Volume 40. - Issue 7, pp. 487-495.

<https://doi.org/10.1134/s1995080219070059>.

4. Salenko O. On the application approach to creating and providing operational characteristics ultralight thermal protection of reusable launch spacecraft /, V. Shchetynin, E. Lashko, O. Potapov, I. Gusarova // Technical and Innovation for the Industry “Machines, Technologies, Materials” - 2018. - Year XII. Issue 3/2018, pp. 109-116.

REFERENCES

1. Maiorova I.A. Optimal Thermal Design of Multishield Thermal Protection System of Reusable Space Vehicle / I.A. Maiorova, P.V. Prosuntsov, A.V. Zuev // Journal of Engineering Physics and Thermophysics - Springer. US, - 2016. - Volume 89. - Issue 2, pp. 528-538. <https://doi.org/10.1007/s10981-016-1406-8>.
2. Qiuyi Xu. Thermomechanical Coupling Analysis and Optimization of Metallic Thermal Protection / Qiuyi Xu, Shu Li, Li Wang, Apeng Dong // J. Shock and Vibration – Hindawi, -2019. - Article ID-1890237. - Pp 1-15. <https://doi.org/10.1155/2019/1890237>.
3. Babaytsev A. Optimization of Thermal Protection Panels Subjected to Intense Heating and Mechanical Loading / A. Babaytsev, V. Dobryanskiy, Yu. Selyaev // 2019. – Springer, - Volume 40. - Issue 7, pp. 487-495. <https://doi.org/10.1134/s1995080219070059>.
4. Salenko O. On the application approach to creating and providing operational characteristics ultralight thermal protection of reusable launch spacecraft /, V. Shchetynin, E. Lashko, O. Potapov, I. Gusarova // Technical and Innovation for the Industry “Machines, Technologies, Materials” - 2018. - Year XII. Issue 3/2018, pp. 109-116.

Received 19.11.2019.

Accepted 21.11.2019.

Планирование эксперимента для выбора параметров пайки элементов теплозащитных конструкций из порошкового сплава (Ni₂₀Cr_{5,95}Al)-Y₂O₃

Рассмотрены вопросы сборки теплозащитной конструкции орбитального космического самолета с внешней теплозащитной панелью, опорами и соединительными элементами из жаростойкого жаропрочного сплава (Ni₂₀Cr_{5,95}Al)-Y₂O₃ высокотемпературной пайкой в вакууме. С целью минимизации количества проведенных экспериментов использовали методику математического планирования эксперимента по схеме ротатабельного центрального композиционного планирования, в основе которого лежит регрессивный анализ. В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, которое адекватно описывает зависимость исследуемой функции от выбранных факторов. Достоверность расчетов подтверждена сборкой макета конструкции с использованием пайки.

Experiment planning to select soldering parameters of elements made of the (Ni₂₀Cr_{5,95}Al) -Y₂O₃ powder alloy of the heat-shielding structure

The parameters of the soldering technology of the external panel, supports and joining elements made of the (Ni₂₀Cr_{5,95}Al) -Y₂O₃ alloy of the heat-shielding structure of the windward part of the orbital spacecraft were selected. Based on the microstructural studies for high-temperature vacuum soldering of thin-walled structures of a powder dispersed-cured

(Ni20Cr5,95Al) - Y₂O₃ alloy, it was shown that the adhesive layer is formed if using developed ПЗ pripium (Ni, 1,5% B, 5% W) in the temperature range 1300-1370°C. The selection of the soldering modes with determination of the soldering temperature, exposure time, clamping forces, geometrical parameters of the workpiece was carried out, using the method of mathematical planning of the experiment according to the scheme of rotatable central compositional planning. As a result of the statistical processing of the experimental data, a second-order regression equation is obtained that adequately describes the dependence of the investigated response function on the selected factors. Based on the numerical experiment, it is shown that temperature and clamping forces have the greatest influence on the strength of the solder joint. The strain value mainly depends on the soldering temperature and geometric parameters. Validation of the calculations was carried out by soldering the (Ni20Cr5,95Al) - Y₂O₃ alloy plates with a thickness of 0.4 mm and 0.15 mm with ПЗ solder in vacuum at 1350°C for 20 minutes. The quality of joining was monitored by microstructural analysis. Experimental studies of the feasibility of a mock-up of a heat-shielding structure with (Ni20Cr5,95Al) - Y₂O₃ alloy components in a high-temperature gas stream have confirmed the viability of selected materials and design of heat protection.

Гусарова Ірина Олександрівна - начальник відділу фізичних методів контролю матеріалів та конструкцій, Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля».

Манько Тамара Антонівна - профессор кафедри технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара.

Саленко Олександр Федорович - професор кафедри конструювання верстатів та машин. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Гусарова Ирина Александровна - начальник отдела физических методов контроля материалов и конструкций, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля».

Манько Тамара Антоновна - профессор кафедры технологии производства, Днепровский национальный университет им. Олеса Гончара.

Саленко Александр Федорович - профессор кафедры конструирования станков и машин. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

Husarova Iryna - head of Physical Methods of Testing Department, Yuzhnoye State Desing Office.

Manko Tamara Antonivna - professor of Production Technology Department, Oles Honchar Dnipro National University.

Salenko Oleksandr Fedorovich - professor of Department of Machine Desing National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky”.