

УДК 519.25

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-3

ГОРОШКО А. В., КОВТУН І. І., КРУШИНСЬКИЙ Д. О.  
Хмельницький національний університет

## РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ МЕТАЛОСКЛЯНИХ ВИРОБІВ РЕА

*У статті представлені результати досліджень міцності склоспаїв у виробках електронної техніки. Проведено розрахунок допустимого розкиду фізико-механічних характеристик матеріалів вузла склоспаю, що забезпечують виконання умови міцності склоспаю, і запропоновано здійснювати вхідний контроль фізико-механічних характеристик використаних матеріалів з подальшим погодженням їх партій. Запропонована методика проектного розрахунку на міцність вузлів металоскляних фотодатчиків РЕА.*

*Ключові слова: склоспай, фотодатчик, міцність, електронні вироби.*

GOROSHKO A., KOVTUN I., KRUSHYNSKYI D.  
Khmelnitskyi National University

## CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHODS ASSESSING THE STRENGTH OF GLASS-TO-METAL PRODUCTS OF ELECTRONIC EQUIPMENT

*The experience of using metal-glass electronics products indicates their low reliability due to mechanical destruction. As a rule, failure is caused by the insufficient ability of incandescent glass to wet the metal to form a tight bond, as well as by the inconsistent thermal expansion of glass and metal, which can cause a decrease in strength and depressurization of the seal when the assembly is cooled. The paper presents the results of studies of the strength of glass-sealed in electronic products. It is shown that the theory of thick-walled Lamé cylinders can be used for the calculation. The calculation of the permissible scatter of the physical and mechanical characteristics of the materials of the glass-weld assembly, ensuring the fulfillment of the strength condition of the glass-weld, was carried out, and it was proposed to carry out the incoming control of the physical and mechanical characteristics of the materials used with the subsequent approval of their batches. A method of design calculation for the strength of units of metal-glass photosensors of electronic equipment is proposed.*

*In, a new design and technological concept of sealing electronic modules in aluminum alloy housings using a multifunctional coating based on Ni and Si, obtained by pulsed laser surfacing. A formula for determining the mobility of surfacing of one layer, taking into account which find the total duration of laser surfacing and the formation of a multifunctional coating. In it is noted that indium and some of its alloys can be used as a solder capable of wetting glass, ceramics and metals and connecting them together. Indium has a low melting point and is very mild; softness allows it to plastically deform and absorb stress due to the mismatch of thermal expansion. Due to the very low pressure, indium vapor is used in glass-metal seals used in vacuum technology and cryogenic applications.*

*Keywords: Glass-to-metal seal, Photosensor, Strength, Electronic Products.*

**Постановка проблеми.** Склоспай (Glass-to-metal seal), які є герметичним щільним з'єднанням скла і металу, є важливим елементом конструкції вакуумних трубок, електричних розрядних трубок, ламп розжарювання, герметичних напівпровідникових діодів, герконів, герметичних скляних вікон в металевих корпусах і металевих або керамічних корпусів електронних компонентів. Досвід експлуатації виробів РЕА, виготовлених за технологією склоспаю показує, що значна частина з них виходить з ладу через механічне руйнування. Як правило, воно викликане недостатньою здатністю розпеченого скла змочувати метал для утворення щільного зв'язку, а також неузгодженим температурним розширенням скла і металу, що може викликати зниження міцності і розгерметизацію ущільнення при охолодженні складання.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У роботі [1] розроблено нову конструкторсько-технологічну концепцію герметизації радіоелектронних модулів в корпусах з алюмінієвих сплавів з використанням багатофункціонального покриття на основі Ni і Si, що отримується імпульсною лазерною наплавкою. Отримано формулу для визначення рухливості наплавлення одного шару, з урахуванням якої знаходять загальну тривалість лазерного наплавлення і утворення багатофункціонального покриття. У роботі [2] відзначається, що індій і деякі його сплави можуть використовуватися в якості припою, здатного змочувати скло, кераміку і метали і з'єднувати їх разом. Індій має низьку температуру плавлення і дуже м'який; м'якість дозволяє йому пластично деформуватися і поглинати напруження через невідповідність теплового розширення. Через дуже низький тиск пара індій знаходить застосування в скло-металевих ущільненнях, що використовуються у вакуумній технології [3] і криогенних застосуваннях [4].

Експериментально встановлено, що руйнування реальних матеріалів відбувається при навантаженнях в 10–100 разів менших, ніж передбачають теоретичні дані. На сьогодні різниця реальної міцності від теоретичної пояснюється за допомогою уявлення про існування різних типів дефектів [5]. Для зменшення концентрації напружень, створюваних дефектами, використовуються різні методи: травлення поверхні скла плавиковою кислотою, «залізування» поверхні скла за допомогою вогневого полірування тощо.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** У роботі [6] обґрунтована можливість використання теорії Ляме-Гадоліна для розрахунку напружень в електронних елементах, що мають форму тіл обертання, зокрема таких металоскляних виробів РЕА, як фотодатчики СФ-2-5, СФ-2-6, СФ-2-9, СФ-2-12, СФ-2-16, ФРЗ-11 (рис. 1). Ці фотодатчики (ФД) є мікроприладами РЕА, що змінюють свої електричні параметри в залежності від освітленості навколишнього середовища або певної інтенсивності світлового потоку, що реєструють наявність випромінювання певної довжини хвилі. Досвід виробництва і експлуатації ФД показав ненадійність конструкції через її недостатню міцність.



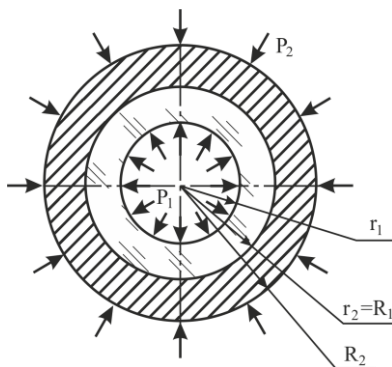
**Рис. 1. Фотодатчики типу СФ**

У роботі представлені деякі результати проведених авторами досліджень, метою яких було оцінювання напружень, що виникають при виробництві і експлуатації ФД, вибір значення коефіцієнта запасу міцності і конструкторські і технологічні рекомендації щодо їх виробництва.

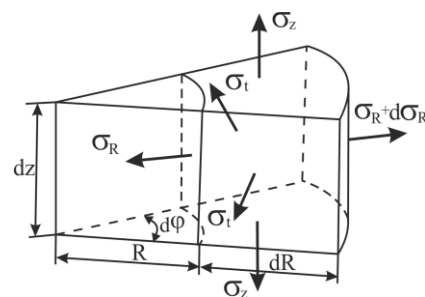
**Результати досліджень.** Розглянемо, наприклад, скляну деталь, що має форму тіла обертання, спаяну з іншою, наприклад, металевою деталлю, яка охоплює скляну. Введемо наступні припущення: не враховуємо напруження, що виникають внаслідок зміни розмірів при склюванні, тобто усадку; закон Гука виконується; справедливою є гіпотеза плоских перерізів.

На рис. 2 представлений переріз вузла виведення через намистинковий склоспай. Скляний циліндр (середній) знаходиться під дією контактної тиску з боку оточуючих його металевих частин. В інших випадках, як наприклад, в діодах, можна вважати, що стінки циліндра знаходяться під дією контактної тиску з боку компаунду і газу, що знаходиться всередині виробу: компаундний циліндр знаходиться під впливом контактних тисків зі боку скляної частини і навколишнього середовища. Таким чином, для всіх випадків слід розглянути розрахунок тіла обертання, що знаходиться під дією контактних тисків по обидва боки.

Розглянемо загальний випадок навантаження циліндрів внутрішнім контактним тиском  $P_1$  і зовнішнім –  $P_2$ . Позначимо  $r_1$  і  $r_2$  – внутрішній і зовнішній радіуси зовнішнього (металевого) циліндра. У тих випадках, коли задовільною є точність розрахунків 5–6%, циліндр з відношенням  $R_2 / r_2 > 4$  можна розглядати таким, що має нескінченно товсту стінку, при цьому величина контактної тиску  $q$  зростає, асимптотично наближаючись до деякого значення. Отже, при інженерних розрахунках можна розглядати навколишню деталь як циліндр з нескінченно великим радіусом.



**Рис. 2. Розрахункова схема типового вузла РЕА**



**Рис. 3. Рівновага нескінченно малого елемента**

Нехай зовнішній циліндр буде навантажений внутрішнім контактним тиском  $q$  (з боку деталі, яку він стискує) і зовнішнім  $P_2$ . Якщо розглянути рівновагу нескінченно малого елемента циліндра, утвореного двома поперечними площинами з відстанню  $dz$  між ними, двома осьовими площинами, з кутом  $d\phi$  між ними і двома циліндрами радіусів  $R$  і  $(R+dR)$ , то можна прийти до відомих формул Ляме:

– для зовнішнього металічного циліндра

$$U_M = \frac{1-2\mu_m}{E_m} \cdot \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} R + \frac{1+\mu_m}{E_m} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R}, \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_t = \frac{R_1^2 q - R_2^2 P_2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{R_1^2 R_2^2 (q - P_2)}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1}{R^2}, \quad \sigma_z = \frac{q R_1^2 - P_2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}; \quad (2)$$

– для внутрішнього скляного циліндра

$$U_c = \frac{1-2\mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} r + \frac{1+\mu_c}{E_c} \cdot \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r}, \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_t = \frac{r_1^2 P_1 - r_2^2 q}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (P_1 - q)}{r_2^2 - r_1^2} \frac{1}{r^2}, \quad \sigma_z = \frac{P_1 r_1^2 - q r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (4)$$

де  $\sigma_R$  – радіальне напруження;  $\sigma_t$  – тангенціальне напруження;  $\sigma_z$  – осьове напруження;  $U_M$  – радіальне переміщення зовнішнього металічного циліндра;  $U_c$  – радіальне переміщення внутрішнього скляного циліндра.

Аналіз результатів розрахунків показав, що у розглянутих конструкціях значення як контактних тисків на границях матеріалів, так і напружень в елементах конструкції більші при використанні скла марки С48-2, ніж при використанні скла марки С52-1. Тому запас міцності елементів конструкції більше в останньому випадку.

Встановлено, що окружні напруження  $\sigma_{t_{R_2}}$  в кришках ФД можуть перебувати в інтервалі, що охоплює значний діапазон величин в залежності від фізико-механічних характеристик сполучних матеріалів і законів зміни температури.

Для оцінювання температурних напружень по радіусу виробу використовувалися викладені у роботі [6] методики і математичні моделі. З їх використанням розраховували температурні поля при склоспаї вікончатого вузла кришок ФД на індукційній установці (рис. 2, 3). Результати розрахунків доводять, що при виготовленні намістинкових склоспаїв для зменшення внутрішніх напружень ефективніше використовувати скло марки С52-1 замість скла С48-2.

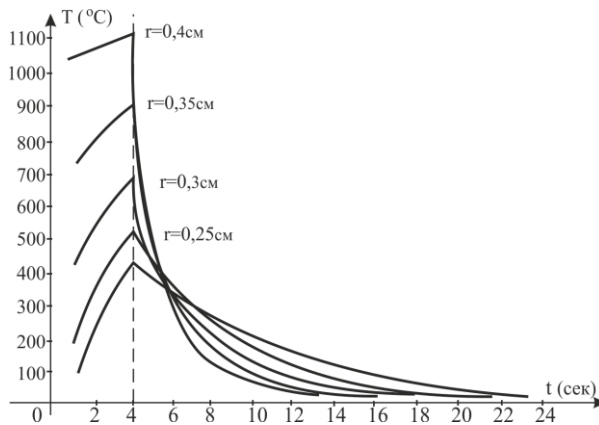


Рис. 2. Зміна температури по радіусу вікончатого склоспаю залежно від часу

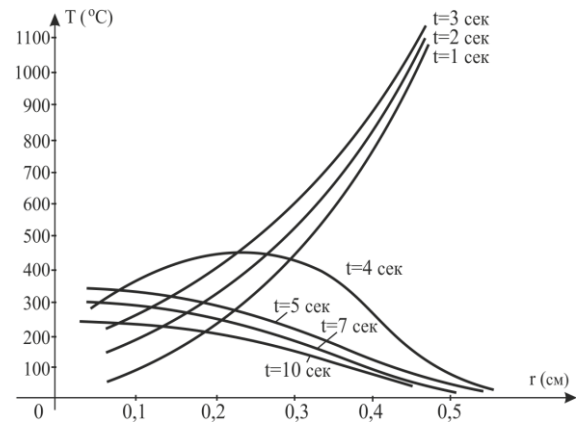


Рис. 3 Зміна температури по радіусу вікончатого склоспаю

Аналіз отриманих даних на рис. 2 і 3 показує, що за перші три секунди температура зовнішньої кромки скла, що з'єднується з металом, досягає 1000°C і відбувається розплав, в той час як в центрі температура не перевищує 200 °C. Після відключення індуктора (на четвертій секунді) видно хвильової процес поширення тепла від краю до центру і назад, що характеризується все ще досить великим градієнтом температур між центром скла і периферією. Необхідно звернути увагу на ту обставину, що при змінах радіусу на 1,5 мм перепад температури лежить в межах лише від 5 °C до 50 °C, що на порядок менше, ніж при зміні радіуса на 5 мм. Результати контрольних розрахунків для вікончатого скла ФД дають величини напружень  $\sigma = (-509,6 \dots 49) \cdot 10^5$  Па, порівнюваних зі значеннями руйнівних напружень для скла С52-1. Якщо врахувати при цьому можливий розкид фізико-механічних характеристик (ФМХ) з'єднувальних матеріалів,

що призводить до збільшення напружень на 20–25 %, мікродфекти і концентратори напружень, то стає зрозумілим 86 % вихід бракованої продукції [6].

Звідси можна зробити практичний висновок: для вікончатого скла ФД, радіус яких сягає 4–5 мм, доцільно відмовитися від індукційного способу розігріву і віддати перевагу іншому, що забезпечує істотно менший перепад температур.

На підставі зазначених розрахунків заводу-виробнику ФД було рекомендовано змінити технологічний процес створення вікончатих склоспаїв таким чином, щоб зменшити градієнт температури по радіусу виробу. Для цієї мети на початку був використаний багатовитковий обертальний кондуктор, що дозволив дещо вирівняти температурне поле і це зменшило кількість дефектів на склі. Надалі операція склоспаювання здійснювалась з використанням графітових касет, які розміщені в муфельній печі, що дозволило збільшити кількість виробів, що проходять цю технологічну операцію одночасно, і домогтися ще більш рівномірного розподілу температури по радіусу ФД.

Як показують розрахункові дані, напруження в цьому випадку становлять:  $\sigma = -47,4 \cdot 10^5$  Па. Економічний ефект від впровадження рекомендації по вирівнюванню температурного поля в процесі операції склоспаювання за рахунок використання муфельної печі і графітових касет склав більше мільйона гривень [6]. Для вузлів іншого класу, наприклад, намістинкових склоспаїв, у яких радіус знаходиться в межах 0,8–1,7 мм, причому розігрів йде як з внутрішньої, так і зовнішньої поверхні, індукційний спосіб розігріву є прийнятним.

Був проведений розрахунок допустимого розкиду ФМХ матеріалів, що використовуються при виготовленні ФД. Такими матеріалами є скло С52-1 і сплав ковар 29НК. Величини допустимих напружень приймалися наступними: на розтяг  $[\sigma]_p = +98 \cdot 10^5$  Па, на стиск –  $[\sigma]_{cm} = -441 \cdot 10^5$  Па. Розрахунок напружень проведено для випадку рівномірного розподілу перепаду температури по радіусу виробу:  $T = \text{const} = 20$  °С. Результати розрахунків зведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

**Розкид фізико-механічних характеристик**

ФМХ	Одиниця вимірювання	Існуючий розкид	Рекомендований розкид
$\alpha_c$	град <sup>-1</sup>	$(46-52) \cdot 10^{-7}$	$(46-49) \cdot 10^{-7}$
$\alpha_m$		$(46-48) \cdot 10^{-7}$	$(46-47) \cdot 10^{-7}$
$E_c$	Па	$(0,5-0,64) \cdot 10^{11}$	$(0,53-0,59) \cdot 10^{11}$
$E_m$		$(1,47-1,86) \cdot 10^{11}$	$(1,47-1,7) \cdot 10^{11}$
$\mu_c$	–	0,24–0,26	0,25–0,26
$\mu_m$		0,28–0,32	0,29–0,31

Порівняння отриманих значень допустимого розкиду ФМХ, що забезпечують виконання умови міцності склоспая, з ДСТУ, показує, що отримані розрахунковим шляхом значення перебивають менші, у порівнянні з існуючими, діапазони значень. Отже, використання матеріалів з ФМХ, величина яких знаходиться в області значень, близькою до краю допуску, може призвести до виникнення у виробках руйнівальних напружень. Уникнути цього явища можна, наприклад, здійснюючи вхідний контроль ФМХ використаних матеріалів з подальшим погодженням їх партій.

У результаті проведених досліджень була розроблена методика проектного розрахунку на міцність вузлів металоскляних фотодатчиків РЕА, що герметизується компаундами. Методика може бути практично використана конструкторами і технологіями. Методика передбачає:

- розрахунок розподілу температури;
- розрахунок температурних напружень для отриманого закону або по одному зі спрощених законів;
- розрахунок контактних тисків і сумарних напружень з урахуванням одночасного впливу тиску і температури;
- визначення напружень, які виникають від експлуатаційних навантажень;
- пошук сумарних напружень в небезпечній точці;
- визначення граничних напружень з урахуванням стану поверхні скла;
- отримання умови міцності.

**Висновки та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі.** Отримані результати у вигляді практичних конструкторських і технологічних рекомендацій і методик можуть використовуватися при виробництві металоскляних виробів РЕА, що дасть змогу підвищити міцність склоспаїв і підвищити надійність РЕА.

### Література

1. Замирец Н. В. и др. Конструкторско технологическая концепция механизма образования лазерного сварного соединения в узлах герметизации радиоэлектронных модулей для изделий космической и специальной техники // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №. 2. – С. 34-41

2. Richard B. Belser (1954). "A Technique of Soldering to Thin Metal Films". Rev. Sci. Instrum. 25 (2): 180–183. doi:10.1063/1.1771017
3. Weissler, G. L., and Robert Warner Carlson. Vacuum physics and technology. Academic Press, 1980.
4. Döge, Stefan, and Jürgen Hingerl. "A hydrogen leak-tight, transparent cryogenic sample container for ultracold-neutron transmission measurements." Review of Scientific Instruments 89.3 (2018): 033903.
5. Abedi, Reza, Robert B. Haber, and Philip L. Clarke. "Effect of random defects on dynamic fracture in quasi-brittle materials." International Journal of Fracture 208.1-2 (2017): 241-268.
6. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с

### References

1. Zamirets N. V. i dr. Konstruktorsko tekhnologicheskaya kontseptsiya mekhanizma obrazovaniya lazernogo svarnogo soyedineniya v uzlakh germetizatsii radioelektronnykh moduley dlya izdeliy kosmicheskoy i spetsial'noy tekhniki //Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2003. – №. 2. – S. 34-41
2. Richard B. Belser (1954). "A Technique of Soldering to Thin Metal Films". Rev. Sci. Instrum. 25 (2): 180–183. doi:10.1063/1.1771017
3. Weissler, G. L., and Robert Warner Carlson. Vacuum physics and technology. Academic Press, 1980.
4. Döge, Stefan, and Jürgen Hingerl. "A hydrogen leak-tight, transparent cryogenic sample container for ultracold-neutron transmission measurements." Review of Scientific Instruments 89.3 (2018): 033903.
5. Abedi, Reza, Robert B. Haber, and Philip L. Clarke. "Effect of random defects on dynamic fracture in quasi-brittle materials." International Journal of Fracture 208.1-2 (2017): 241-268.
6. Механика в электронике. Монография: [в 3 т.] Т. 1: Статическая прочность / Ройзман В. П. - Хмельницкий : ХНУ – 2015. - 313 с

Надійшла / Paper received: 28.10.2020

Надрукована / Paper Printed : 01.12.2020