

Є. С. Болюбаш

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМИ РОЗДІЛЕННЯ РАКЕТ-НОСІЇВ

Піротехнічні пристрої є важливими елементами в ракетно-космічній техніці, які значною мірою визначають успішність польоту ракет-носіїв, оскільки дозволяють виконувати миттєві операції щодо відокремлення відпрацьованих ступенів, зміни конфігурації, забезпечення безпеки тощо. До піротехнічних пристроїв ставлять жорсткі вимоги щодо надійності, безпеки, збережуваності й ефективності. У статті розглянуто експериментальне дослідження працездатності лінійного кумулятивного заряду системи розділення ступенів ракет-носіїв. Цей тип лінійного кумулятивного заряду є одним з найпоширеніших типів лінійного кумулятивного заряду, що використовують у системах розділення ракет-носіїв, які розробляють в Україні. Однією із основних характеристик лінійного кумулятивного заряду, що визначає ефективність і надійність процесу розділення, є глибина проникнення кумулятивного струменя в перешкоду. У роботі досліджено дію кумулятивного струменя лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною частиною. Подано експериментальне підтвердження працездатності такого типу лінійного кумулятивного заряду, на прикладі лінійного кумулятивного заряду діаметром 5 мм, що діє на перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219. Наведено методiku дослідження, схему проведення експерименту, зокрема опис об'єкта дослідження та схему замірів результатів випробування. Було проведено заміри глибини проникнення кумулятивного струменя в перешкоду в 60 точках по лінії різі досліджуваних зразків. Проведено статистичний аналіз результатів експерименту, зокрема визначено середню глибину проникнення. Запропоновано удосконалену формулу для практичного розрахунку глибини проникнення кумулятивного струменя для лінійного кумулятивного заряду з напівциліндричною кумулятивною частиною, що використовує додатковий коефіцієнт корекції. Зазначено, що на глибину проникнення кумулятивного струменя в перешкоду істотним чином впливають технологічні аспекти. З урахуванням такого впливу визначено нижню межу одностороннього толерантного інтервалу. Подано рекомендації, які спрямовані на вдосконалення майбутніх експериментальних процедур. На основі отриманих результатів було встановлено, що лінійні кумулятивні заряди, які досліджували, є працездатними та відповідають вимогам до лінійного кумулятивного заряду систем розділення ракет-носіїв.

**Ключові слова:** кумулятивний ефект, кумулятивний заряд, лінійний кумулятивний заряд, системи розділення, піротехнічні пристрої розділення, ракета-носій.

*Pyrotechnic devices are important elements in rocket and space technology, which to a large degree determine the flight success of the launch vehicles, since they enable instantaneous operations to separate spent stages, change configurations, ensure safety, etc. Pyrotechnic devices are subject to strict requirements for reliability, safety, security and efficiency. The article presents an experimental study of the performance of a linear shaped charge of a launch vehicle stage separation system. This type of linear shaped charge is one of the most common types of linear shaped charge, which are used in launch vehicle separation systems being developed in Ukraine. One of the main characteristics of the linear shaped charge, which determines the efficiency and reliability of the separation process, is the depth of penetration of the cumulative jet into the obstacle. The work studied the effect of a cumulative jet of a linear shaped charge with a semi-cylindrical cumulative part. An experimental confirmation of the performance of this type of linear shaped charge is presented, using the example of a linear shaped charge with a diameter of 5 mm, acting on an obstacle made of aluminum alloy grade 2219. The research methodology, experimental scenario, in particular, a description of the research object and a scheme for measuring test results are presented. Depth of cumulative jet penetration into the obstacle was measured in 60 points along the cut line of the samples under study. A statistical analysis of the experimental results was carried out, in particular, the average penetration depth was determined. An improved formula is proposed for the practical calculation of the penetration depth of a cumulative jet for a linear shaped charge with a semi-cylindrical cumulative part, using an additional correction factor. It is noted that the depth of penetration of a cumulative jet into an obstacle is significantly influenced by technological aspects. Taking into account this influence, the lower limit of the one-sided tolerance interval was determined. Recommendations are provided to improve future experimental procedures. Based on the obtained results, it was established that the linear shaped charges under study are operational and meet the requirements for linear shaped charges, installed on launch vehicle separation systems.*

**Key words:** cumulative effect, shaped charge, linear shaped charge, separation systems, pyrotechnic separation devices, launch vehicle.

## Вступ

Піротехнічні пристрої (ПП) відіграють важливу роль у багатьох системах ракетно-космічної техніки (РКТ), де вимагається миттєве виконання операцій. ПП використовують для відділення відпрацьованих ракетних ступенів (блоків), відокремлення корисного вантажу від останнього ступеня ракети-носія (РН), скидання пасивних мас, що виконали своє функціональне призначення, розділення конструкції утримування РН на пусковому столі, а також як один із виконавчих органів системи аварійного припинення польоту та ін.

До ПП належать:

- піротехнічні ініціатори;
- піротехнічні приводи;
- піротехнічні клапани;
- піротехнічні болти, гайки;
- піротехнічні заряди, кумулятивні заряди, лінійні кумулятивні заряди, детонувальні шнури;

- піротехнічні лінії передачі детонації;
- піротехнічні газогенератори;
- піротехнічні запальники;
- піротехнічні різакі тощо.

Працездатність ПП характеризується комплексом параметрів, зокрема часом спрацювання, надійністю, безпекою, збережаністю, ефективністю. Час спрацювання ПП є одним із найважливіших параметрів, оскільки він визначає своєчасність виконання операцій (відділення ступенів або елементів РН та ін.). Надійність ПП характеризує їхню здатність виконувати свої функції в заданому діапазоні умов. Безпека ПП характеризує їхню здатність не завдавати шкоди людям або обладнанню під час виконання з ними наземних операцій, або суміжним системам РН при їх спрацюванні. Збережаність ПП характеризує час, протягом якого вони можуть виконувати свої функції без необхідності їх заміни. Ефективність ПП характеризує їх здатність розрізати конструкцію в заданому діапазоні умов, при цьому повинна досягатися висока чистота під час спрацювання (не повинно бути уламків, нашарувань, виривів у місці розділення матеріалу конструкції тощо).

Особливе місце серед широкого спектра завдань, які виконують ПП в РКТ, посідають операції розділення. Одним з найбільш

ефективних типів ПП для виконання таких операцій у системах розділення є лінійні кумулятивні заряди (ЛКЗ), рис. 1.

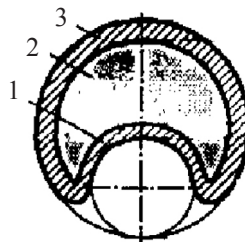


Рис. 1. Загальний вигляд ЛКЗ з напівциліндричною кумулятивною частиною [1]:

1 – кумулятивна частина; 2 – бризантна вибухова речовина; 3 – оболонка ЛКЗ

Системи розділення, які використовують ЛКЗ, мають високу надійність розділення перешкоди, невелику вартість, невеликі габаритні розміри, малу вагу конструкції, незначний час спрацювання (мікросекунди та мілісекунди), можливість перебувати в режимі очікування спрацювання без періодичного технічного обслуговування системи [5].

У піротехнічних системах розділення, оснащених ЛКЗ, руйнування зв'язків між ступенями чи елементами конструкції забезпечується проникненням кумулятивного струменя (КС) в перешкоду.

У [1–4] наведено ряд методів розрахунку глибини проникнення КС в перешкоду для ЛКЗ з клиновидною кумулятивною частиною (рис. 2). Проте ці методи не дозволяють розрахувати глибину проникнення КС для ЛКЗ з напівциліндричною кумулятивною частиною (КЧ).

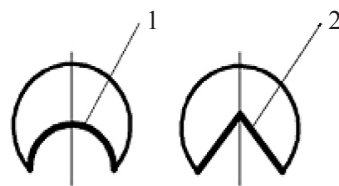


Рис. 2. Форма кумулятивної частини ЛКЗ:

1 – напівциліндрична КЧ; 2 – клиновидна КЧ

Отже, для забезпечення працездатності ПП систем розділення, оснащених ЛКЗ з напівциліндричною КЧ, актуальним є проведення досліджень з визначення глибини проникнення КС в перешкоду. З цією метою

було проведено експериментальне дослідження проникнення КС для ЛКЗ з напівциліндричною КЧ в алюмінієвий сплав марки 2219.

Глибина проникнення кумулятивного струменя є одним з основних параметрів, що визначають ефективність і надійність піротехнічних пристроїв системи розділення. Якщо глибина проникнення кумулятивного струменя недостатня, то піротехнічний пристрій не зможе забезпечити ефективне руйнування зв'язків між ступенями або елементами конструкції в РКТ. Таким чином, експериментальне дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя в перешкоду є важливим етапом підтвердження працездатності піротехнічних пристроїв системи розділення.

**Метою** статті є дослідження глибини проникнення кумулятивного струменя ЛКЗ визначеного діаметра з напівциліндричною КЧ у перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219.

### Завдання дослідження

1. Проведення експериментів з проникнення КС в перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219.

2. Проведення вимірювань глибини проникнення КС в перешкоду.

3. Аналіз результатів дослідження та визначення технологічних факторів, які впливають на глибину проникнення КС в перешкоду.

4. Отримання співвідношення для визначення глибини проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною кумулятивною частиною в перешкоду, яке буде придатним для практичного використання.

### Методика дослідження

Проведення експериментального дослідження включало таку послідовність дій:

1. Підготовка зразків перешкоди. Було виготовлено зразки перешкоди з алюмінієвого сплаву марки 2219 з товщиною, що перевищує очікувану глибину проникнення КС в кілька разів. Зразки було спеціально підготовлено й оброблено для забезпечення однорідності матеріалу та мінімізації можливих дефектів.

2. Підготовка ЛКЗ. Використовували стандартизовані кумулятивні заряди, виготовлені в Науково-інженерному центрі «Матеріалообробка вибухом» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона (м. Глеваха). Кожен заряд був ретельно перевірений перед експериментом.

3. Встановлення ЛКЗ на перешкоду. Було розроблено кронштейни, які дозволяють встановлювати ЛКЗ на зразки перешкоди з високою точністю (витримуючи фокусну відстань) і контролем.

4. Вимірювання глибини проникнення. Після кожного експерименту проводили вимірювання глибини проникнення кумулятивного струменя в перешкоду.

5. Аналіз даних. Після проведення експериментів дані були систематизовані та проаналізовані за допомогою аналітичних методів.

### Об'єкт дослідження

Схему для проведення дослідження наведено на рис. 3.

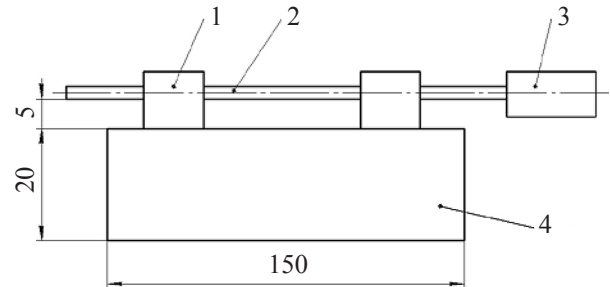


Рис. 3. Схема для проведення дослідження:  
1 – кронштейн кріплення ЛКЗ; 2 – ЛКЗ;  
3 – електродетонатор;  
4 – металева пластина (перешкода)

До складу об'єкта випробувань належать ЛКЗ з такими характеристиками: матеріал оболонки – мідь, діаметр 5 мм, наважка вибухової речовини (гексогену) 11,5 г/м; металева пластина з алюмінієвого сплаву марки 2219 завтовшки 20 мм, що має такі характеристики: межа міцності  $\sigma_B = 44,5$  кгс/мм<sup>2</sup>, межа пластичності  $\sigma_{0,2} = 33$  кгс/мм<sup>2</sup>, відносне подовження  $\delta = 10$  %; кронштейни кріплення ЛКЗ; електродетонатор.

Форма ЛКЗ, яку використовують в експерименті, стандартизована, відповідає номенклатурі заводу-виготворювача і наближена

до циліндричної з напівциліндричною кумулятивною частиною.

На пластину 4, що є перешкодою, встановлюють ЛКЗ 2 за допомогою кронштейнів 1, які забезпечують задану фокусну відстань. ЛКЗ задіюється за допомогою електродетонатора 3, встановленого в торець ЛКЗ. Було проведено шість досліджень з метою встановлення глибини проникнення КС в перешкоду на фокусній відстані, яка дорівнювала 5 мм. Дослідний зразок з встановленим ЛКЗ подано на рис. 4.

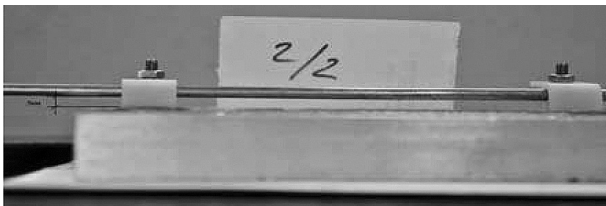


Рис. 4. Дослідний зразок перед випробуванням

Після випробувань для проведення вимірювань зразки надрізали по лінії різі ЛКЗ зі зворотного боку, не доходячи до зони проникнення КС, потім вони відокремлювалися. За допомогою фотографії високої роздільної здатності оцінювали глибину проникнення кумулятивного струменя у перешкоду (рис. 5).

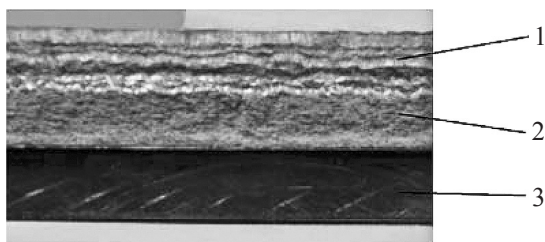


Рис. 5. Структура перешкоди зі сплаву марки 2219 після проникнення КС ЛКЗ:  
1 – слід від проникнення КС;  
2 – слід від розділення зразка (після експерименту);  
3 – слід від надрізу дисковою фрезою

Для зняття розмірів фотографії дослідного зразка імпортували до програми САПР типу AutoCAD, де отримували необхідний масштаб дослідного зразка. Після цього замірювали глибину проникнення КС. Схему проведення замірів на зразку, який досліджують, подано на рис. 6. Після кожного випробування було проведено десять замірів глибини проникнення КС ( $L$ ) вздовж лінії

різу перешкоди ЛКЗ у точках від 5 до 140 мм (із кроком 15 мм).

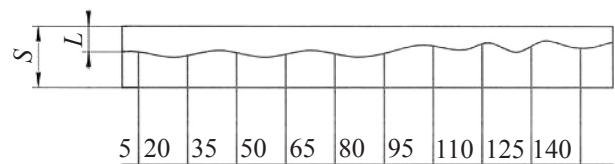


Рис. 6. Схема проведення замірів:  
 $S$  – товщина перешкоди;  $L$  – замір глибини проникнення кумулятивного струменя;  
(5/20...140) – точки зняття замірів

## Результати випробувань

Результати випробувань наведено у таблиці.

### Глибина проникнення КС ЛКЗ у сплав марки 2219

Відстань до точки виміру, мм	5	20	35	50	65
$L$ , мм (дослід № 1)	6,62	6,51	6,38	6,34	6,21
$L$ , мм (дослід № 2)	6,39	6,68	6,47	6,51	6,43
$L$ , мм (дослід № 3)	6,13	5,98	6,01	6,13	5,73
$L$ , мм (дослід № 4)	6,5	6,07	5,97	6,17	5,81
$L$ , мм (дослід № 5)	6,84	6,74	6,53	6,17	6,48
$L$ , мм (дослід № 6)	5,87	5,77	5,5	5,82	6,03
$L_{\min}$ , мм	5,87	5,77	5,5	5,82	5,73
$L_{\text{середнє}}$ , мм	6,39	6,29	6,14	6,19	6,12
$L_{\max}$ , мм	6,84	6,68	6,53	6,51	6,48
Відстань до точки виміру, мм	80	95	110	125	140
$L$ , мм (дослід № 1)	6,12	6,25	6,21	6,34	6,38
$L$ , мм (дослід № 2)	6,43	6,17	6,3	6,47	6,43
$L$ , мм (дослід № 3)	5,88	6,04	6,18	6,28	6,04
$L$ , мм (дослід № 4)	5,24	6,07	5,97	5,91	5,41
$L$ , мм (дослід № 5)	6,38	6,02	6,01	6,32	6,02
$L$ , мм (дослід № 6)	6,19	5,71	5,93	5,39	5,93
$L_{\min}$ , мм	5,24	5,71	5,93	5,39	5,41
$L_{\text{середнє}}$ , мм	6,04	6,04	6,10	6,12	6,04
$L_{\max}$ , мм	6,43	6,25	6,3	6,47	6,43

### Аналіз даних

Для аналізу надамо результати дослідження у вигляді графіка (рис. 7).

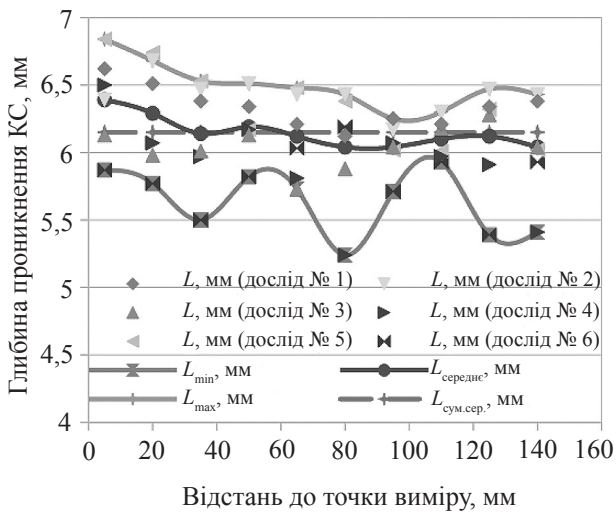


Рис. 7. Глибина проникнення КС в перешкоду зі сплаву марки 2219

З графіка видно, що глибина проникнення КС ЛКЗ у перешкоду зі сплаву марки 2219, для фокусної відстані 5 мм, змінюється в межах від 5,24 до 6,84 мм. Середня глибина проникнення кумулятивного струменя ЛКЗ у дослідний зразок становить  $L_{\text{сум.сєр.}} = 6,15$  мм (штрихова лінія на рис. 7). Під час аналізу експериментальних зразків виявлено нерівномірне проникнення кумулятивного струменя у перешкоду, глибина проникнення КС змінювалася вздовж лінії різь.

Відхилення глибини проникнення КС від середнього значення становить від  $-14,8\%$  до  $+11,2\%$ . Ця нерівномірна поведінка може бути пов'язана з технологічними обмеженнями виготовлення ЛКЗ, а саме з технологічними відхиленнями в розмірах оболонки ЛКЗ, особливо її кумулятивної частини, відмінної густини наважки вибухової речовини вздовж кумулятивного заряду, а також з особливостями розподілення структури матеріалу перешкоди, її однорідністю, з точністю виготовлення кронштейнів кріплення ЛКЗ та точністю складальних операцій при встановленні ЛКЗ. Це припущення підтверджують наведені в [2] дані (рис. 8).

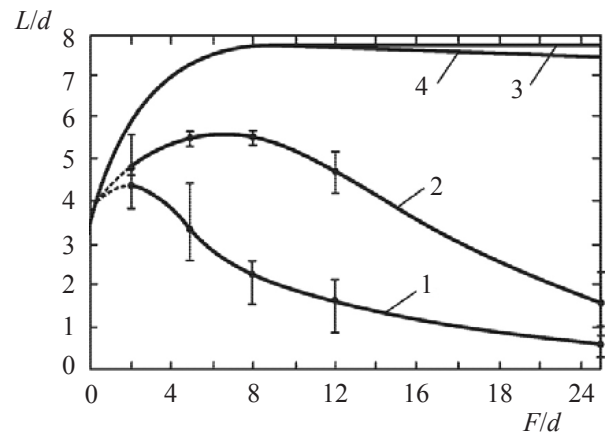


Рис. 8. Залежність відносної глибини проникнення КС від відносної відстані кумулятивного заряду (КЗ) з мідним конічним облицюванням до міцної сталеві перешкоди ( $H_v = 3,2$  ГПа) [2]:

- 1 – КЗ зі звичайною технологією виготовлення;
- 2 – прецизійний КЗ; 3 – ідеальний КЗ; 4 – ідеальна КС у повітрі;  $L$  – глибина проникнення КС;
- $F$  – фокусна відстань встановлення ЛКЗ;
- $d$  – діаметр ЛКЗ

Як видно з рис. 8, глибина проникнення КС для ЛКЗ, виготовленого за прецизійною точністю, на 30 % більша від ЛКЗ, виготовленого за звичайною технологією. Таким чином, підтверджується значний вплив технологічних обмежень на глибину впровадження КС в перешкоду.

### Чисельний розрахунок глибини проникнення КС

Аналіз формул розрахунку глибини проникнення КС для ЛКЗ з клиновидною КЧ в [1–4] показує, що всі вони зводяться до відомої формули Лаврентьєва [3]

$$L_{\text{Лавр}} = l \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}, \quad (1)$$

де  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – густини металу КС і перешкоди відповідно;  $l$  – довжина КС, дорівнює довжині КЧ. У нашому випадку  $l = 4,6$  мм (довжина КЧ ЛКЗ-5);  $\rho_1 = 8,96$  г/см<sup>3</sup> (густина для міді);  $\rho_2 = 2,85$  г/см<sup>3</sup> (густина для алюмінієвого сплаву марки 2219). Отже, за формулою (1) отримаємо таке значення:

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} = 4,6 \sqrt{\frac{8,96}{2,85}} = 8,16 \text{ мм.}$$

За результатами експерименту визначимо коефіцієнт корекції, який дозволить використовувати формулу Лаврентьєва для розрахунку глибини проникнення КС. Коефіцієнт корекції – це число, яке використовують для врахування різниці між результатами розрахунків за формулою та результатами експериментальних досліджень. У нашому випадку коефіцієнт корекції використовують для врахування різниці між результатами розрахунку за формулою Лаврентьєва і результатами експериментальних досліджень.

Так, для мідного ЛКЗ циліндричної форми з напівциліндричною КЧ, наповненого гексогеном, для розділення перешкод із алюмінієвого сплаву марки 2219 коефіцієнт корекції становить:

$$k = \frac{L_{\text{сум.сер}}}{L_{\text{Лавр.}}} = \frac{6,15}{8,96} = 0,754.$$

Отже, формула (1) визначення глибини проникнення КС в перешкоду з урахуванням коефіцієнта корекції набуде такого вигляду:

$$L = k \cdot l \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Тоді

$$L = 0,754 \cdot 4,6 \sqrt{\frac{8,96}{2,85}} = 6,15 \text{ мм.}$$

Слід зазначити, що коефіцієнт корекції, був отриманий на основі експериментальних досліджень для конкретного ЛКЗ та матеріалу перешкоди. Для інших типів ЛКЗ або марок матеріалів перешкод потрібно провести аналогічні дослідження для визначення відповідного коефіцієнта корекції.

Для інженерних розрахунків слід врахувати вплив технологічних обмежень, який обумовлений наявним виробництвом. З цією метою визначимо нижню межу одностороннього толерантного інтервалу для глибини проникнення КС в перешкоду. Тобто такий інтервал повинен містити не менше долі  $\rho$  статистичної сукупності із довірчою імовірністю  $\gamma$ . Нижню межу одностороннього толерантного інтервалу визначимо згідно зі стандартом [6].

Попередньо встановимо, чи підпорядковується випадкове значення глибини

проникнення КС ЛКЗ у перешкоду нормальному закону. Для цього, за даними результатів випробувань з таблиці (будемо розглядати як вибірку), у програмі LabPlot2 побудуємо гістограму (рис. 9). Належність вибірки до нормального розподілу перевіримо за критерієм Девіда-Хартлі-Пірсона, який має такий вигляд [7]:

$$U = \frac{R}{s},$$

де  $R = x_{\text{max}} - x_{\text{min}}$  – розмах вибірки;  $s$  – стандартне відхилення вибірки.

Гіпотезу нормальності приймають, якщо виконується умова

$$U_1(n; \alpha) < U < U_2(n; \alpha),$$

де  $n$  – кількість вибірки;  $\alpha$  – рівень значущості (вибираємо  $\alpha = 0,05$ ).

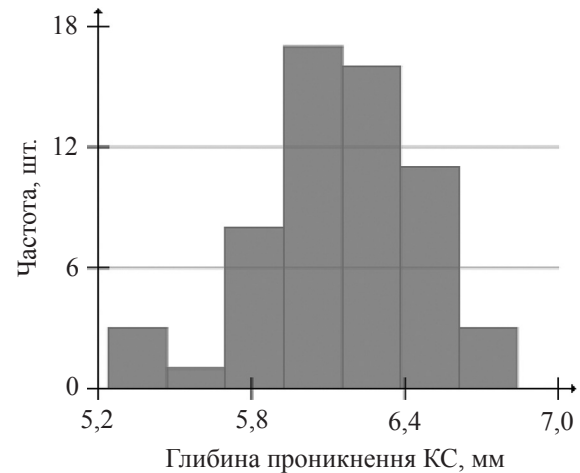


Рис. 9. Гістограма розподілу глибин проникнення КС

У нашому випадку:  $R = 6,84 - 5,24 = 1,6$  мм;  $s = 0,33$  мм, а отже:

$$U = 1,6/0,33 = 4,85.$$

Критичні точки беремо із таблиці [7], вони для  $n = 60$  і  $\alpha = 0,05$  становлять:

$$U_1(60; 0,05) = 3,96;$$

$$U_2(60; 0,05) = 5,51.$$

Оскільки  $3,96 < 4,85 < 5,51$ , то гіпотеза нормальності вибірки не відхиляється.

Для нормальності вибірки нижній односторонній толерантний інтервал для глибини

проникнення КС ЛКЗ у перешкоду визначають за формулою [6]

$$L_n = L - k(N; \rho; \gamma) \cdot s, \quad (2)$$

де  $L$  – середнє вибірки (дорівнює 6,15 мм);  $s$  – оцінка стандартного відхилення (становить 0,33 мм);  $k(N; \rho; \gamma)$  – коефіцієнт, що залежить від об'єму вибірки та величин  $\rho$  і  $\gamma$ .

Будемо використовувати такі значення  $\rho = 95\%$  і  $\gamma = 0,95$ . Для цих значень об'єму вибірки  $n = 60$  знаходимо [6]

$$k(60; 0,95; 0,95) = 2,023.$$

Підставляючи отримані значення у формулу (2), маємо

$$L_n = 6,15 - 2,023 \cdot 0,33 = 5,48 \text{ мм.}$$

Отже, в нашому випадку отриманий результат щодо гарантованої глибини проникнення КС у перешкоду для практичних розрахунків треба зменшити на 10,9 % відносно середнього значення.

### Рекомендації

Для вдосконалення майбутніх експериментальних процедур рекомендовано:

- проводити комплексний аналіз матеріалів перешкоди, урахувавши однорідність матеріалу, його механічні властивості та мікроструктурні особливості. Це забезпечить точніше розуміння того, як різноманітні характеристики матеріалу впливають на проникнення КС у перешкоду;

- проводити ультразвуковий контроль товщини оболонки ЛКЗ, зокрема його кумулятивної частини із записами в карти обміру;

- проведення експериментів у масштабі, наближеному до реальних розмірів конструкції. Це допоможе подолати розрив між лабораторним тестуванням і повномасштабним застосуванням у готовому виробі. Масштабні випробування могли б виявити більш реалістичні характеристики проникнення КС у перешкоди;

- підвищення технологічності виготовлення ПП та систем розділення. Це забезпечить підвищення ефективності, надійності й економічності цих систем.

Також важливо продовжувати вдосконалювати теоретичні моделі з метою збільшення точності передбачення поведінки кумулятивного струменя в різних умовах.

### Висновки

На основі експериментів з визначення глибини проникнення КС в перешкоду з алюмінієвого сплаву марки 2219 на фокусній відстані 5 мм було встановлено, що КС ЛКЗ діаметром 5 мм, з напівциліндричною кумулятивною частиною здатний ефективно проникати в перешкоду із алюмінієвого сплаву марки 2219 на глибину від 5,24 до 6,84 мм. Середня глибина проникнення кумулятивного струменя ЛКЗ в перешкоду становить 6,15 мм.

Технологічні обмеження впливають на глибину проникнення КС в перешкоду. Для їх урахування за результатами експерименту треба зменшити розрахункову глибину проникнення КС на 10,9 %.

Запропоновано формулу визначення глибини проникнення КС ЛКЗ з напівциліндричною кумулятивною частиною в перешкоду, за допомогою чисельного розрахунку.

Наведено рекомендації щодо вдосконалення майбутніх експериментальних процедур.

Результати дослідження надають цінні дані для оптимізації масових характеристик конструкції шляхом використання ЛКЗ з мінімальними, але достатніми енергетичними характеристиками; допоможуть у розробленні ефективніших і надійних систем для ракетно-космічної техніки.

Розуміння характеристик глибини проникнення КС в перешкоду може знайти застосування в інших галузях інженерних досліджень. Це може бути корисним під час проектування захисних конструкцій для будівель, транспортних засобів та інших систем, що зазнають впливу різних загроз.

Таким чином, проведено комплексне експериментальне дослідження одного з основних параметрів, що визначає ефективність і надійність процесу розділення – глибини проникнення КС в перешкоду, що дозволило підвищити ефективність, надійність і працездатність ПП системи розділення ступенів РН.

**Список використаної літератури**

1. Петушков В. Г. Под ред. Б. Е. Патона, Применение взрыва в сварочной технике, К.: Наук. думка, 2005, 754 с.
2. Физика взрыва. Изд. третье, т. II. Под ред. Л. П. Орленко. Наука, 2004, 644 с.
3. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Гос. изд. ФМлит. М. 1959, 800 с.
4. Колесников К. С., Козлов В. И., Кокушкин В. В. Динамика разделения ступеней летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1977, 224 с.
5. Кумулятивний ефект та його використання для розділення ракетно-космічних елементів за допомогою піротехнічних пристроїв. Є. С. Болюбаш. Матеріали XVII наукових читань «Дніпровська орбіта – 2022» (26–28 жовтня). Дніпро, 2022. 263 с.
6. ISO 16269–6:2003 Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals (IDT).
7. Кобзар А. Н. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006, 816 с.

Стаття надійшла 29.01.2024