

УДК 629.5  
DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-70-79

**КРИТЕРИИ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНОГО ТИПА  
И МАТЕРИАЛА ГЛУБОКОВОДНЫХ ИЛЛЮМИНАТОРОВ  
ДЛЯ ЧЕРНОМОРСКОГО БАСЕЙНА**

**В.Ю. Кочанов**

старший научный сотрудник  
кафедры Проектирование и производство конструкций  
из композиционных материалов

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова*

***Аннотация.** Разработаны критерии выбора светопрозрачных элементов конических, сферических и цилиндрических глубоководных иллюминаторов из органического и неорганического стекла на основе сравнительного анализа их технических и технологических характеристик, эксплуатационных нагрузок, а также напряженно-деформированного состояния и характера разрушения.*

***Ключевые слова:** светопрозрачные элементы иллюминаторов, органическое и неорганическое стекло, напряжение, деформации, характер разрушения.*

УДК 629.5  
DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-70-79

**КРИТЕРІЙ ВИБОРУ КОНСТРУКТИВНОГО ТИПУ  
І МАТЕРІАЛУ ГЛИБОКОВОДНИХ ІЛЮМІНАТОРІВ  
ДЛЯ ЧОРНОМОРСЬКОГО БАСЕЙНУ**

**В.Ю. Кочанов**

старший науковий співробітник  
кафедри Проектування та виробництво конструкцій  
із композиційних матеріалів

*Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова*

***Анотація.** Розроблено критерії вибору світлопрозорих елементів конічних, сферичних і циліндричних глибоководних ілюмінаторів з органічного та неорганічного скла на основі порівняльного аналізу їх технічних і технологічних характеристик, експлуатаційних навантажень, а також напружено-деформованого стану та характеру руйнування.*

***Ключові слова:** світлопрозорі елементи ілюмінаторів, органічне і неорганічне скло, напруження, деформації, характер руйнування.*

© Кочанов В.Ю., 2019

UDC 629.5

DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-70-79

SELECTION CRITERIA OF CONSTRUCTIVE TYPE  
AND MATERIAL FOR DEEP PORTHOLES  
OF THE BLACK SEA POOL

**Kochanov V.Yu.**

Senior Researcher department of Department  
of Design and Production of Structures from Composite Materials

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding*

**Abstract.** *Selection criteria of translucent elements of conical, spherical and cylindrical deep-sea portholes made from organic and inorganic glass based on a comparative analysis of their technical and technological characteristics, operational loads, as well as the stress-strain state and the nature of fracture were developed.*

**Keywords:** *translucent porthole elements, organic and inorganic glass, stress, deformation, fracture pattern.*

**Вступ.** В сучасній глибоководній техніці використовуються різноманітні конструкції ілюмінаторів, які можна умовно класифікувати за формою та матеріалом світлопрозорого елемента. Це різноманіття пов'язано з відмінністю умов експлуатації глибоководних ілюмінаторів: робочим тиском; температурою та агресивністю навколишнього середовища; режимом навантаження; способом реєстрації зображення та інше. Світлопрозорий елемент ілюмінатору, як частина оптичної системи, безпосередньо впливає на якість зображення, а від його міцності залежить надійність всього підводного технічного засобу. До світлопрозорого елемента пред'являються жорсткі вимоги за критеріями міцності, герметичності, деформацій оптичних поверхонь під навантаженням, оптичних і теплофізичних властивостей матеріалу.

Найбільш фундаментальні рекомендації щодо проектування та вибору конструктивного типу та геометричних параметрів акрилових ілюмінаторів різних конструктивних типів розроблені Д. Стечивом (Лабораторія ВМС США) [1] та остаточно сформульовані в [2]. Приклади використання неорганічного скла в конструкціях підводної техніки достатньо широко розглянуто в роботі українських вчених [3]. Проте, проблема раціонального вибору конструктивного типу і матеріалу глибоководних ілюмінаторів на початковому етапі проектування підводних технічних засобів у кожному конкретному випадку є і досі актуальною.

**Постановка задачі** – обґрунтувати переваги та недоліки глибоководних ілюмінаторів в залежності від конструктивного типу та матеріалу світлопрозорого елемента і запропонувати критерії їх вибору в залежності від умов експлуатації підводного технічного засобу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У зв'язку з тим, що світлопрозорі елементи виконують функції як ланки оптичної системи, так і частини міцного корпусу підводного апарату, проблеми, що виникають при проектуванні, носять комплексний оптико-механічний характер. Тому вимоги, що пред'являються до світлопрозорих елементів за різними критеріями, часто суперечать один одному. Так, світлопрозорі елементи з органічного скла не схильні до крихкого руйнування і тому надійні при експлуатації, але не завжди задовольняють вимогам оптики внаслідок значних деформацій оптичних поверхонь та нестабільності їх форми, що викликана плинністю матеріалу під навантаженням. Тому задача раціонального вибору конструктивного типу і матеріалу глибоководного ілюмінатора для різних умов експлуатації, зокрема для Чорноморського басейну, є досить актуальною.

Традиційними матеріалами для виготовлення світлопрозорих елементів є поліметилметакрилат (органічне скло, плексиглас) і неорганічні (переважно кварцові) стекла, порівняльні властивості яких наведено у таблиці. Існують приклади використання в якості матеріалу для ілюмінаторів високого тиску прозорого кварцу, ситалів, сапфіру, алмазу та деяких штучних кристалів [4].

Органічне скло – термопластичний полімер на основі вінілового ефіру метакрилової кислоти, основні властивості наведені в таблиці. Механічні властивості оргскла при простих видах навантаження регламентовані технічними умовами на матеріал, однак при навантаженні світлопрозорих елементів виникає складний напружено-деформований стан.

Другою особливістю роботи світлопрозорих елементів є тривале навантаження гідростатичним тиском. Відомо, що оргскло, як і всі полімери, має яскраво виражені реологічні властивості, тобто його деформування суттєво залежать від тривалості перебування під навантаженням.

При виготовленні глибоководних ілюмінаторів з оргскла необхідно враховувати їх переваги та недоліки.

Переваги:

- низька густина оргскла дозволяє зменшити масу ілюмінатору;
- високий (до 93 %) коефіцієнт світло пропускання;
- твердість оргскла близька до алюмінію, матеріал зручний до механічної обробки;
- як високомолекулярний полімер, оргскла має відмінну хімічну стійкість до неорганічних сполук, міцність зберігається протягом тривалого часу;
- припускається можливість склеювання оргскла, зменшення міцності клеєного шву незначне;
- оргскло має відмінні у порівнянні з неорганічним склом протидарні властивості.

Недоліки:

- через низький модуль пружності оргскла виникають значні деформації світлопрозорих елементів і погіршуються оптичні властивості;
- оргскло, як високомолекулярний полімер має помітну повзучість під навантаженням, що обмежує його використання для значних глибин (гідростатичний тиск досягає межі плинності матеріалу);
- низька твердість оргскла сприяє пошкодженості оптичних поверхонь (легко подряпається);
- високий коефіцієнт лінійного температурного розширення оргскла викликає суттєві деформації і напруження внаслідок перепаду температур всередині і зовні підводного апарату;
- невисока стійкість до органічних розчинників викликає набухання, утворення тріщин, зниження оптичних властивостей і міцності оргскла, що обмежує його використання в забруднених акваторіях.

Неорганічне скло практично не має альтернативи для виготовлення ілюмінаторів, які при експлуатації занурюються на рівень абісальних рівнин (до 5500 м). Тут гідростатичний тиск може досягати рівня напружень плинності для ілюмінаторів з органічного скла і їх використання можливо тільки для нечастих і нетривалих занурень. Основні характеристики неорганічного скла наведені в таблиці.

*Таблиця*

*Порівняльні характеристики органічного та неорганічного стекл*

Характеристика	Чисельне значення	
	Органічне скло	Зміцнене неорганічне скло
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1190	2500
Коефіцієнт заломлення	1,49	1,52
Коефіцієнт світлопропускання, %	93	99
Міцність при розтягуванні, МПа	80	140-250
Модуль пружності, ГПа	3	70-75
Відносне подовження, %	4,5	< 2
Міцність при згинанні, МПа	105	150
Границя плинності при стисканні, МПа	126	600-1200
Міцність при зсуві, МПа	63	–
Коефіцієнт лінійного розширення, К <sup>-1</sup>	7×10 <sup>-5</sup>	5,4×10 <sup>-7</sup>
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,2-0,3	1,38
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1270	1052
Температура розм'якшення, °С	100	530

Для неорганічного скла характерна низька міцність при розтягуванні і підвищена крихкість. Це пояснюється наявністю великої кількості дефектів (що є концентраторами напружень), які виникають на різних стадіях виготовлення і експлуатації світлопрозорих елементів: при варці скла; в процесі шліфування і полірування оптичних поверхонь; в процесі монтажу та інше.

Неорганічне скло особливо чутливе до наявності поверхневих дефектів, які є ініціаторами тріщини, тому міцність при розтягуванні майже на порядок нижче чим при стисканні. Для зменшення кількості поверхневих дефектів застосовують різні методи обробки: механічну, фізичну і хімічну.

Механічна обробка поверхні неорганічного скла передбачає шліфування з подальшим поліруванням абразивними пастами, при цьому шорсткість поверхні і відповідно розмір дефектів можуть бути знижені до 5 мкм.

Хімічні методи обробки поверхні полягають в травленні неорганічного скла в розчині фтористоводневої кислоти. Це дозволяє згладити нерівність поверхні, міцність підвищується в 2-3 рази, однак погіршується якість полірування та оптичних властивостей. Також при травленні утворюються слаборозчинні солі (кремнефторіди лужних металів) у вигляді матових налетів на поверхні скла, що важко змиваються. При травленні на товщину більш 10 мкм поверхня стає оптично непридатною.

Фізичні методи засновані на створенні напружень стискання у поверхневих шарах скла, що суттєво підвищують міцність при згинанні та розтягуванні. Напруження стискання можна отримати термічним загартовуванням скла, але ця технологія придатна лише для відносно товстих листів (>20 мм). Більш перспективним є іонообмінний метод зміцнення неорганічних стекол, що полягає в дифузійному заміщенні катіонів натрію більшими за розмірами катіонами калію та літію. При цьому міцність збільшується більш ніж в 3 рази [5].

На міцність неорганічного скла помітно впливає зовнішнє середовище. До більшості хімічних сполук неорганічне скло інертне. В той же час, швидкість розповсюдження тріщин в склі залежить від середовища. В нейтральних і лужних розчинах скло проявляє себе як слабка кислота, що прагне утворювати кислий розчин в вершині тріщини. Руйнування скла під навантаженням визначають два паралельних процеси: просування тріщини та округлення її вершини (тобто зменшення концентрації напружень). За даними багаточисленних досліджень [6], для стекол границя статичної витривалості дорівнює 50 % міцності при короткочасному навантаженні.

При використанні неорганічних стекол для виготовлення світлопрозорих елементів враховують такі фактори.

Переваги:

- границя міцності при стисканні дуже велика (до 1200 МПа);
- відсутня небезпека корозії у морській воді; низький коефіцієнт лінійного розширення не викликає великих температурних деформацій.

Недоліки:

- невелика міцність до ударних навантажень і деформацій розтягування;

- технологія виготовлення неорганічного скла не дозволяє усунути всі дефекти структури матеріалу;
- важко забезпечити однорідну якість матеріалу, значна дисперсія показників міцності;
- характер руйнування неорганічного скла крихкій та катастрофічний;
- після зміцнення неорганічного скла подальша обробка неможлива;
- неорганічне скло має значну (як для підводної техніки) густину.

Таким чином, неорганічне скло може бути ефективно використано в конструкціях ілюмінаторів, де світлопрозорий елемент витримує дію переважно стискаючих напружень, що значно знижує ризик стрімкого руйнування.

В цілому, з урахуванням показників міцності, характеру руйнування, технології виготовлення та обробки більш доцільним є застосування в якості матеріалу світлопрозорих елементів органічного скла, особливо для відносно невеликих (до 2500 м) глибин.

В сучасних глибоководних ілюмінаторах традиційно використовують три геометричних форми світлопрозорих елементів: у вигляді плоского циліндра, усіченого конусу та сектору сферичної оболонки (рис. 1; 2).

Сферичні ілюмінатори, у порівнянні з іншими, мають найбільш однорідний розподіл напружень усередині світлопрозорого елемента, широкий кут огляду, але вносять оптичну аберацію при використанні звичайних об'єктивів і потребують точного налаштування і центрування оптичної системи. При використанні сферичних світлопрозорих елементів, для кожного типорозміру необхідно підбирати спеціальний гідрооб'єктив. Для плоских циліндричних світлопрозорих елементів використання звичайних ширококутних об'єктивів також супроводжується аберацією і для підвищення якості зображення потрібне налаштування. Але, гідрооб'єктиви, що розраховані для роботи з плоскими ілюмінаторами є придатними для будь-яких їх типорозмірів, аби вони забезпечували необхідний кут огляду, крім того не потрібне центрування оптичної системи. Характеристики міцності світлопрозорих елементів (значення гідростатичного тиску при руйнуванні) залежить, в першу чергу, від співвідношення товщини до діаметру оглядового вікна, а для конічних і сферичних впливає також кут конусності опорної поверхні.

Світлопрозорі елементи у вигляді плоских дисків найменш міцні внаслідок виникнення значних напружень розтягування на поверхні низького тиску. Для зменшення цих напружень конструктивно збільшують співвідношення між діаметром світлопрозорого елемента і діаметром оглядового отвору, що звужує поле огляду і збільшує контактні напруження в зоні опорного ущільнювального кільця. Це робить неефективним використання плоских циліндричних ілюмінаторів особливо для великих глибин.

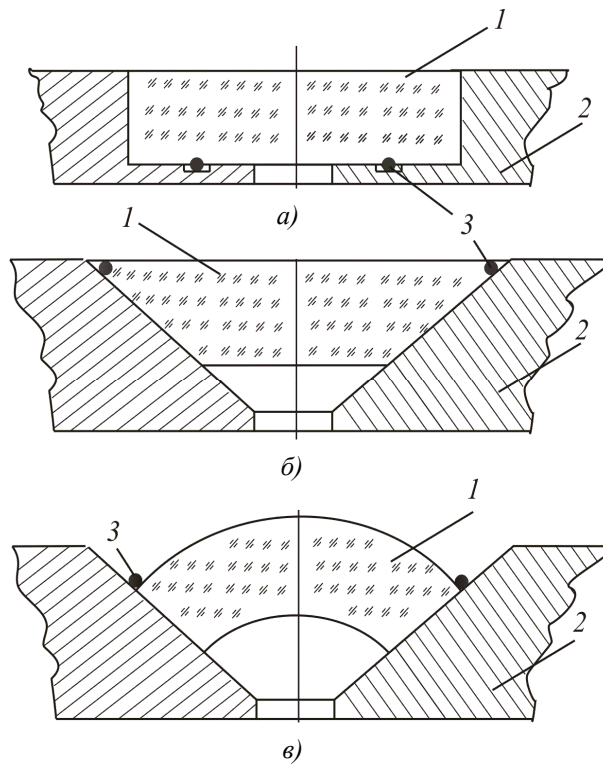


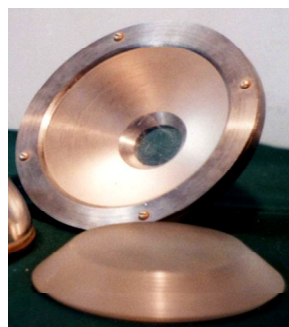
Рис. 1. Конструктивні схеми глибоководних ілюмінаторів:  
а – плоский циліндричний ілюмінатор; б – конічний ілюмінатор;  
в – сферичний ілюмінатор; 1 – світлопрозорий елемент; 2 – корпус  
3 – ущільнюваний елемент

Найкращі характеристики міцності мають сферичні ілюмінатори, в яких діють практично однорідні напруження стискання. В зв'язку з цим для них найбільш ефективно використання неорганічного скла з високою міцністю на стискання.

Конічні ілюмінатори дещо поступаються за міцністю сферичним, що пов'язано з неоднорідним полем напружень, однак, як показали численні дослідження [7-9], при співвідношенні товщини до діаметру більш ніж 0,5 та куті конусності більше  $90^\circ$  в світлопрозорому елементі діють переважно напруження стискання, що надає їм значної надійності в аварійних випадках. Також конічні і сферичні ілюмінатори мають властивості самоущільнення і герметизації. В залежності від конструктивного типу ілюмінатори мають різний характер руйнування світлопрозорого елемента. Сферичні ілюмінатори значної відносної товщини руйнуються внаслідок виникнення дотичних напружень на опорній поверхні і розвитку системи сферичних концентричних тріщин.



а)



б)



в)

*Рис. 2. Натурні глибоководні ілюмінатори різних конструкцій:  
а – плоский циліндричний ілюмінатор; б – конічний ілюмінатор;  
в – сферичний ілюмінатор*

В тонких ілюмінаторах спостерігається втрата стійкості сферичної оболонки і катастрофічне руйнування.

Тонкі циліндричні ілюмінатори руйнуються від напружень розтягування у центрі поверхні низького тиску, а відносно товсті на опорному ущільнювальному кільці від дії значного контактного тиску. У конічних ілюмінаторів реалізується найбільш «спокійний» і поступовий механізм руйнування, який проявляється у виникненні кільцевих тріщин зсуву на опорній конічній поверхні, які у процесі розвитку виходять на поверхню високого тиску. При цьому центральна частина світлопрозорого елемента відділяється від периферійної не втрачаючи монолітності і герметичності.



**Висновки.** При виборі конструктивного типу і матеріалу світлопрозорого елемента глибоководного ілюмінатора для відносно невеликих глибин експлуатації (в басейні Чорного моря) з урахуванням характеристик міцності, оптичних, технологічних та ущільнюючих властивостей і за міркуваннями надійності і відносно безпечного характеру руйнування найбільш ефективними є конічні ілюмінатори зі світлопрозорими елементами з органічного скла.

Перспективним напрямом подальших досліджень є удосконалення конструкції корпусу ілюмінаторів, умов закріплення конічного світлопрозорого елемента та способів герметизації.

На основі аналізу довготривалих і повторно-статичних навантажень глибоководних ілюмінаторів гідростатичним тиском пропонується за напрямком подальших досліджень удосконалення конструкції корпусу та схеми герметизація світлопрозорих елементів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стэчив. Проектирование безопасных иллюминаторов для камер повышенного давления / Дж.Д. Стэчив. М.: Наука, Конструирование и технология машиностроения. Т. 93. № 4. 1971. С. 61-73.
2. ASME PVHO-1. 2012. Safety standard for pressure vessels for human occupancy. New York (NY): American Society of Mechanical Engineers. P. 131.
3. Писаренко Г.С., Амелянович К.К., Каринцев И.Б. / Г.С.Писаренко, К.К.Амелянович, И.Б.Каринцев. Несущие и светопрозрачные элементы конструкций из стекла. К.: Наукова Думка, 1987. 200 с.
4. Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях/Д.С. Циклис. М.: Химия, 1976. 432 с.
5. Бутаев А.М., Келина Р.П., Виноградова О.П. Упрочнение оптического стекла методом низкотемпературного ионного обмена / А.М. Бутаев, Р.П. Келина, О.П. Виноградова. Оптико-механическая промышленность. 1982. № 3. С.38-40.
6. Богуславский И.А. Высокопрочные закаленные стекла / И.А. Богуславский. М.: Стройиздат, 1969. 207 с.
7. Дж.Д. Стэчив. Конические акриловые иллюминаторы при длительном воздействии гидростатического давления 1400 кгс/см<sup>2</sup>. / Дж.Д. Стэчив. М.: Наука, Конструирование и технология машиностроения. Т. 92. № 2. 1970. С.321-329.
8. Дж.Д. Стэчив. Конические акриловые иллюминаторы при длительном воздействии гидростатического давления 700 кгс/см<sup>2</sup>/ Дж.Д. Стэчив. М.: Наука, Конструирование и технология машиностроения. Т. 94. № 4. 1972. С.92-98.
9. Стечив Дж. Конические акриловые иллюминаторы под длительным давлением 350 кгс/см<sup>2</sup>/Дж. Стечив. Конструирование и технология машиностроения. М.: Наука, 1972. Т. 94. № 3. С.78-83.

## REFERENCES

1. Stachiw J.D. (1971) *Proektirvanie bezopasnyih illyuminatorov dlya kamer povyishennogo davleniya [Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya]* Moskva: Nauka, Vol. 93(4), pp. 61-72. (in Russian).
2. ASME PVHO-1. (2012) *Safety standard for pressure vessels for human occupancy*. New York (NY): American Society of Mechanical Engineers, 131 p.
3. Pisarenko G.S., Amelyanovich K.K., Karinczev I.B. (1987) *Nesushhie i sveto-prozrachnye element konstrukcij iz stekla*. Kiev: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian).
4. Cziklis D.S. (1976) *Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovanij pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh*. Moskva: Khimiya, 432 p. (in Russian).
5. Butaev A.M., Kelina R.P., Vinogradova O.P. (1982) *Uprochnenie opticheskogo stekla metodom nizkotemperaturnogo ionnogo obmena [Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost]*. Vol. 3. P. 38-40. (in Russian).
6. Boguslavskij I.A (1969) *Vysokoprochnye zakalennye stekla*. Moskva: Strojizdat, 207 p. (in Russian).
7. Stachiw J.D. (1970) *Konicheskie akrilovye illyuminatory pri dlitelnom vozdeystvii gidrostaticeskogo davleniya 1400 kgs/sm<sup>2</sup> [Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya]*. Moskva: Nauka Vol. 92. (2). pp.321-329. (in Russian).
8. Stachiw J.D. (1972) *Konicheskie akrilovye illyuminatory pri dlitelnom vozdeystvii gidrostaticeskogo davleniya 700 kgs/sm<sup>2</sup> [Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya]*. Moskva: Nauka. Vol. 94(4). pp.92-98. (in Russian).
9. Stachiw J.D. (1972) *Konicheskie akrilovye illyuminatoryi pod dlitelnym davleniem 350 kgs/sm<sup>2</sup> [Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya]* Moskva: Nauka, Vol. 94 (3), pp. 78-83.(in Russian).

*Стаття надійшла до редакції 12.03.20*

**Посилання на статтю:** Кочанов В.Ю. Критерии выбора конструктивного типа и материала глубоководных иллюминаторов для Черноморского бассейна // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2020. № 1(61). С. 70-79. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-70-79.

*Article received 12.03.20*

**Reference a JournalArtic:** Kochanov, V. Selection criteria of constructive type and material for deep portholes of the Black Sea pool // Herald of the Odessa national maritime university. 1(61). 70-79 // DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-70-79.