

UDC 539.8; 678.746

PACS numbers: 62.20.-x; 78.40.Me

## Підвищення рівномірності характеристик пластмасового сцинтилятора за рахунок зменшення внутрішніх напружень

С.М. Ковальчук, А.Ю. Бояринцев

[kovalchuk@isma.kharkov.ua](mailto:kovalchuk@isma.kharkov.ua) [boyarintsev@isma.kharkov.ua](mailto:boyarintsev@isma.kharkov.ua)

*Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, пр. Науки, 60, 61072 Харків*

ORCID: [0000-0002-5791-4810](https://orcid.org/0000-0002-5791-4810), [0000-0001-9252-0430](https://orcid.org/0000-0001-9252-0430).

DOI: [10.26565/2222-5617-2021-35-05](https://doi.org/10.26565/2222-5617-2021-35-05)

У даній роботі представлені результати дослідження впливу внутрішніх напружень на рівномірність збору світла у пластмасовому сцинтиляторі (ПС) та встановлення умов отримання довгомірних пластмасових сцинтиляторів з низьким рівнем внутрішніх напружень.

У якості використовуваних дослідних зразків були взяті пластмасові сцинтилятори на основі полістиролу, які були виготовлені у повітряному полімеризаторі з мономеру стиролу шляхом радикальної термоініційованої полімеризації в алюмінієвій ампулі.

Для зменшення внутрішніх напружень в полістирольній полімерній основі ПС проводився відпал зразків сцинтиляторів при температурі 100 °С. Після витримки впродовж 12 годин здійснювалось поступове охолодження зразків зі швидкістю 2,5 °С/год. Для зменшення поверхневих напружень внаслідок адгезії ПС до стінок форми використане внутрішнє покриття форми для полімеризації політетрафторетиленом. Встановлено значення внутрішніх напружень в матеріалі ПС до і після додаткового відпалу зразків, а також у випадку використання антиадгезійного покриття. Контроль внутрішніх напружень здійснювався за допомогою кругового полярископа ПКС-250М. Для обчислення внутрішніх напружень розраховувалася різниця головних напруг у плоских пластинах пластмасового сцинтилятора. Розмір пластин сцинтиляторів для оцінки внутрішніх напружень 10×50×300 мм. Для вимірювання рівномірності розподілу відносного світлового виходу вздовж довгомірного пластмасового сцинтилятора використовувались зразки розміром діаметр 50х1000мм.

Отримані дані показали, що додатковий відпал заготовок пластмасового сцинтилятора та використання антиадгезійного покриття форми для полімеризації зменшує рівень внутрішніх напружень у пластмасовому сцинтиляторі з 1,8÷2,9МПа до 0,55÷1,0МПа. Неоднорідність розподілу відносного світлового виходу вздовж довгомірного пластмасового сцинтилятора розміром діаметр 50х1000мм вдалось зменшити до  $\Delta C \leq 3\%$ .

**Ключові слова:** пластмасовий сцинтилятор, полістирол, внутрішні напруження, неоднорідність, відпал, антиадгезійне покриття.

## Increasing the uniformity of characteristics of a plastic scintillator by reducing its internal stresses

S.M. Kovalchuk, A.Yu. Boyarintsev

*Institute of Scintillation Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, 60 Nauky Ave., 61072 Kharkiv*

This paper presents the results of the study of internal stresses effect on the light collection uniformity in a plastic scintillator (PS) and setting conditions for obtaining long plastic scintillators with a low level of internal stresses.

Plastic scintillators based on polystyrene were used as test samples, produced in an air polymerizer from styrene monomer by radical thermoinitiated polymerization in an aluminum ampoule.

To reduce internal stresses in the polystyrene polymer base of the PS, scintillator samples were annealed at a temperature of

100 °C. After a 12 hours exposure, the samples were gradually cooled at a rate of 2.5 °C/h. To reduce the surface tension due to the adhesion of the PS to the walls of the polymerization mold, the inner coating of the polymerization mold with polytetrafluoroethylene was used. The values of internal stresses in the PS material before and after additional annealing of the samples, as well as in the case of using the anti-adhesive coating, were determined. The control of internal stresses was carried out using a PKS-250M circular polariscope. To calculate the internal stresses, the difference of main stresses in the flat plates of the plastic scintillator was calculated. The dimensions of scintillator plates for evaluation of internal stresses are 10×50×300 mm. To measure the uniformity of the relative light output distribution along the long plastic scintillator, samples with dimensions of  $\phi 50 \times 1000$  mm were used.

The obtained data showed that additional annealing of plastic scintillator blanks and the use of anti-adhesive coating for the polymerization mold reduce the level of internal stresses in the plastic scintillator from 1.8÷2.9 MPa to 0.55÷1.0 MPa. The non-uniformity of the relative light output distribution along the long plastic scintillator with dimensions of  $\phi 50 \times 1000$  mm was reduced to  $\Delta C \leq 3$  %.

**Keywords:** plastic scintillator, polystyrene, internal stresses, non-uniformity, annealing, anti-adhesive coating.

## ВСТУП

У сучасних експериментах фізики високих енергій (НЕР) для реєстрації частинок, як базові детектори, як правило, використовуються широкоапертурні електромагнітні та адронні калориметри. Калориметри типу сендвіч, (з комірчастою або площинною структурою) включають багато десятків та сотень тисяч елементарних лічильників. Найчастіше роль таких лічильників виконують ефективні пластмасові сцинтилятори (ПС). Наприклад вітчизняні сцинтилятори серії UPS (Ukrainian Plastic Scintillator) на полістирольній основі знайшли використання в таких мюонних системах детектування: CMS (Compact Muon Solenoid) [1], LHCb (Large Hadron Collider) [2] та ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) [3].

Важливою вимогою до ПС при їх використанні є вимога високої прозорості та однорідності світлозбору. Особливо це важливо в калориметрії при вимірюванні енергії частинок адронної зливи, що проходить через широкі смуги ПС (довжиною до 5 м). Створення детекторів для реєстрації нізкоенергетичного гамма-випромінювання на основі сцинтиляційної пластмаси з композиційним шаром [4] потребує високу прозорість та однорідність ПС. Також для вирішення таких завдань, як визначення рівня розплаву однією з необхідних вимог є однорідність спаду світлового сигналу вздовж довгомірного сцинтилятора.

Природно, що тільки при дуже високій прозорості такого довгомірного сцинтилятора, та хорошій однорідності світлозбору можна досягти високої енергетичної роздільної здатності детектора.

Причиною невисокої прозорості та однорідності світлозбору існуючих ПС є, по-перше, поглинання, зазвичай присутні у вихідній мономерній сировині, по-друге, різного роду центри, що розсіюють (структурні дефекти, включення, пористість і т.п.), що виникають в процесі отримання ПС, а також внутрішніх напруг, що виникають у процесі полімеризації стиролу в масі.

Інший, не менш важливий чинник ослаблення світла в оптично прозорому полімерному середовищі – розсіювання. Відомо, що оптично прозорі та явно аморфні полімери - полістирол, полівінілтолуол (PVT), поліметилметакрилат (PMMA) дають незначне,

несуттєве для багатьох застосувань розсіювання, але за умови високої локальної однорідності матеріалу.

У загальному випадку матриця аморфного полімеру являє собою складну систему з розподіленими в ній великими і дрібними центрами, що розсіюють. При цьому характер неоднорідностей, відповідальних за розсіювання, визначається не тільки природою та будовою макромолекул, а й типом надмолекулярних утворень, що формуються у процесі полімеризації та сильно залежать від умов його проведення. Відповідно до сучасних уявлень, матриця аморфних полімерів може складатися або з глобул - згорнутих в клубок макромолекул («coil-model») [5], або з пачок, утворених паралельним укладанням полімерних ланцюгів («bundle-model») [6]. В одному і в іншому випадку, через можливі відмінності в локальній упаковці макромолекул, в мікрообластях полімерної матриці можуть виникнути згустки і розрідження речовини, тобто. матиме місце флуктуація густини. Саме неоднорідності цього і є, як відомо, відповідальними за розсіювання аморфних полімерів. Так, при середньому значенні флуктуації щільності  $(\eta^2)^{1/2} = 2,76 \cdot 10^{-4}$ , інтенсивність розсіювання в PMMA, згідно Дебая [7], виявляється на порядок вище розсіювання на малих неоднорідностях (типу глобул) і на два порядки вище розсіювання на теплових флуктуаціях. Результати інших численних експериментів підтверджують, що навіть незначна локальна неоднорідність полімерної матриці може призвести до великого ефекту світлорозсіювання [8-11]. Цим, вочевидь обумовлене те що ізотропне розсіювання аморфних полімерів зазвичай варіюється дуже широкими межах. Вирішення низки проблем, пов'язаних з абсорбційними втратами, дозволило, при розробці технології отримання великогабаритних полістирольних сцинтиляторів, у кілька разів знизити рівень втрат світла у сцинтиляційному матеріалі [12].

Однією з суттєвих причин виникнення неоднорідностей, які призводять до збільшення розсіювання і як наслідок до погіршення прозорості полімерного середовища ПС є внутрішні напруження всередині полімеру.

Мета цієї роботи полягала у визначенні впливу внутрішніх напружень на світлозбір у пластмасовому

сцинтиляторі та встановлення умов отримання довгомірних пластмасових сцинтиляторів з низьким рівнем внутрішніх напружень.

Можна виділити декілька чинників, що впливають на виникнення подібних напружень. По-перше сам процес полімеризації супроводжується суттєвими змінами густини полімерного середовища внаслідок конвекційних потоків, температурних флуктуацій, усадки полімеру, створення глобул макромолекул. При цьому неоднорідності розподіляються за всім об'ємом сцинтилятора. Значні зміни в безпосередньому процесі отримання ПС для зниження виникаючих неоднорідностей зазвичай недоцільні з технологічної та економічної точки зору. Але існує можливість зменшити внутрішні напруження в аморфному матеріалі за рахунок додаткової термічної обробки матеріалу – відпалу. По-друге причиною виникнення значних напружень в поверхневому шарі ПС є адгезія полімеру до стінок форми в якій проводиться полімеризація. Зазвичай матеріал форми це алюміній, адгезія якого до полістиролу досить велика і призводить до виникнення значних напружень в поверхневому шарі при відриві зразка від стінок форми. В даному випадку зменшити напруження а значить і неоднорідність полімерного середовища можна за рахунок використання покриття форми, наприклад на основі політетрафторетилена [13], що суттєво знижує адгезію матеріалів.

У цій роботі досліджено можливість підвищення рівномірності характеристик пластмасового сцинтилятора за рахунок зменшення внутрішніх напружень, як шляхом проведення додаткового відпалу, та і в наслідок використання антиадгезійного покриття форми для полімеризації.

#### МЕТОДИКА ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Заготовки пластмасових сцинтиляторів було отримано методом термоініційованої радикальної полімеризації в масі [12]. Зразки ПС необхідного розміру вирізались із блоку. Заготовки, шліфувались та полірувались до оптичної прозорості.

Для вимірювання неоднорідності спаду відносного світлового виходу використовувались сцинтилятори на основі полістиролу UPS-923A розміром 50\*1000мм.

Відносний світловий вихід полістирольних сцинтиляторів вимірювали на сцинтиляційному спектрометрі. У якості фотоприймачі використовувався ФЕП Hamamatsu 2" R1306. Зразки ПС встановлювали безпосередньо на поверхню фотокатода ФЕП (оптичний контакт забезпечувався за допомогою імерсійної рідини). Джерело іонізуючого випромінювання Cs137 встановлювалося по черзі в п'яти точках впритул до сцинтилятора на відстані 20, 35, 50, 65, 80см від ФЕП. Як відбивач використовувався відбивач типу Tyvek. Світловий вихід  $C_i$  визначали по положенню максимуму

піку амплітудного сцинтиляційного спектру.

Далі отримані значення світлового виходу за допомогою комп'ютера були апроксимовані за допомогою експоненційної функції методом найменших квадратів.

$$C(x) = C_0 \times e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

де  $C_0$  початковий світловий вихід у каналах,  $\alpha$  - коефіцієнт експоненційного згасання,  $x$  - товщина матеріалу, через який проходить світло (розташування джерела іонізуючого випромінювання відносно ФЕП). Дані вимірювань нормувалися відносно отриманої функції

$$C_i(x)_n = \frac{C_i(x)}{C(x)_n} \quad (2)$$

Неоднорідність спаду відносного світлового виходу обчислювалася за формулою

$$\Delta C = \frac{C(x)_{\max} - C(x)_{\min}}{C(x)_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (3)$$

Полімерне середовище пластмасового сцинтилятора таке, як полістирол зазвичай являє собою матеріал з ізотропними оптичними властивостями. Але наявність внутрішніх напружень в матеріалі обумовлює виникнення неоднорідностей густини (а значить і коефіцієнту заломлення) і призводить до анізотропії оптичних властивостей. Характер розподілу та величину напружень у матеріалі можна оцінити за допомогою полярископу. Принцип його дії заснований на явищі подвійного променезаломлення в анізотропних середовищах (кристали, прозорі матеріали з внутрішніми напруженнями) при проходженні через них лінійно-поляризованого світла. Випромінювання від джерела проходить через теплофільтр, конденсорну систему, лінійний поляризатор, матове скло, з розташованим на ньому досліджуванним зразком і аналізатор. Після лінійного поляризатора виходить лінійно-поляризоване випромінювання, що падає на зразок. Якщо зразок має анізотропію (оптичні властивості зразка різні для різних напрямів випромінювання), то зразок спостерігається розкладання одного пучка променів на два (звичайний і незвичайний). Аналізатор наводить коливання звичайного та незвичайного променів в одну площину. Внаслідок чого відбувається інтерференція світла. Введена випробуваним зразком різниця ходу між звичайним і незвичайним променями пропорційна величині внутрішнього напруження і визначається за кольоровою шкалою полярископу.

Визначення внутрішніх напружень здійснювалось за допомогою полярископу ПКС-250М. Зразки пластмасового сцинтилятора у формі плоских пластин для вимірювань мали розміри 10\*50\*300мм, та були

виготовлені з того ж матеріалу що і зразки діаметром 50\*1000мм.

За виміряним на круговому полярископі ПКС-

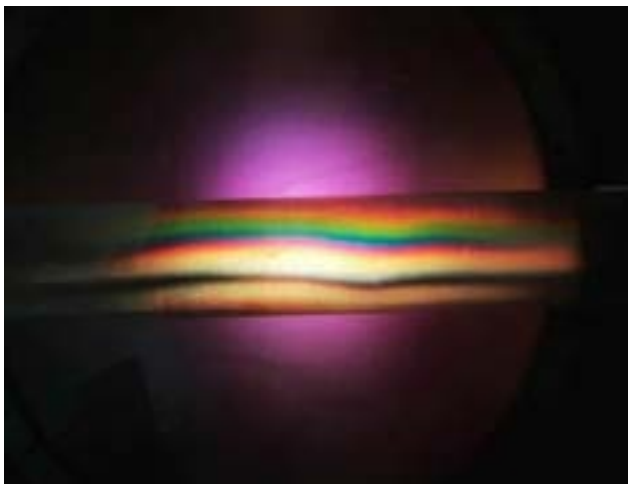


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразка ПС 10×50×300 мм у полярископі (після полімеризації).

250М значенням оптичної різниці ходу ( $\delta$ ), відповідно до рівняння Вертгейма [14] розраховувалася різниця головних напруг у плоских пластинах пластмасового скінтілятора:

$$n_1 - n_2 = \frac{\delta}{cd} \tag{4}$$

Таблиця 1

Різниця ходу та внутрішнє напруження в зразках ПС після стандартної полімеризації.

	До відпалу		
	1	2	3
Різниця ходу, нм	325	260	200
внутрішнє напруження, МПа	2,9	2,3	1,8

де  $\delta$  - оптична різниця ходу,  $C$  - оптичний коефіцієнт напруги в полістиролі ( $C=5,57 \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/кг),  $n_1 - n_2$  - різниця головних напруг у поздовжньому і поперечному напрямку пластини,  $d$  - товщина пластини в см. Максимальні тангенційні напруження ( $\tau_{max}$ ) обчислювались за формулою

$$\tau_{max} = \frac{(n_1 - n_2)}{2} \tag{5}$$

Обчислення внутрішніх напружень та однорідності світлового виходу здійснювалось до та після відпалу. Також вимірювання проводились для зразків які були виготовлені у стандартній формі та у формі з використанням антиадгезійного покриття.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для оцінки величини внутрішніх напружень за допомогою полярископу виготовлені зразки розміром 10×50×300 мм. Для оцінки впливу напружень на однорідність скінтіляційних характеристик виготовлено низку довгомірних зразків розміром діаметром 50×1000 мм. Зразки виготовлялись з однієї

частини блочної заготовки.

Під час дослідження зразків ПС за допомогою полярископу в аналізаторі можна спостерігати нерівномірне інтерференційне забарвлення (рис.1) яке свідчить про наявність значних внутрішніх напружень

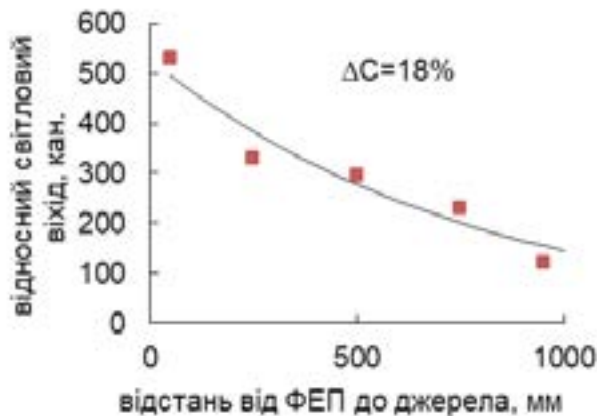


Рис.2. Залежність зменшення відносного світлового виходу при переміщенні джерела випромінювання вздовж зразка скінтілятора діаметром 50×1000 мм після полімеризації.

в матеріалі.

Згідно з кольоровою таблицею полярископу для кожного зразка було визначено максимальну різницю ходу та обчислено відповідно до (4,5) значення максимального внутрішнього напруження в зразку ПС. Отримані дані наведені в таблиці 1.

Отримані дані дають значення внутрішнього напруження порядку 1,8-2,9МПа. Це доволі суттєві

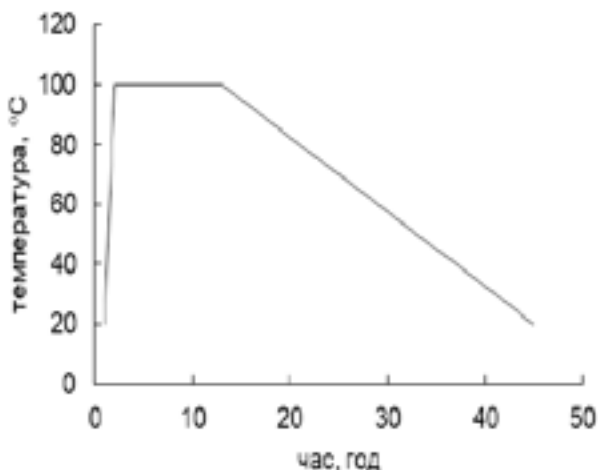


Рис. 3. Режим відпалу зразків скінтілятора.

значення на практиці проявляються у вигляді нерівномірності скінтіляційних характеристик в об'ємі ПС. Так, якщо зразок ПС розміром діаметром 50×1000мм встановити одним торцем безпосередньо на ФЕП і переміщувати джерело випромінювання вздовж зразка, то при вимірюванні відносного світлового

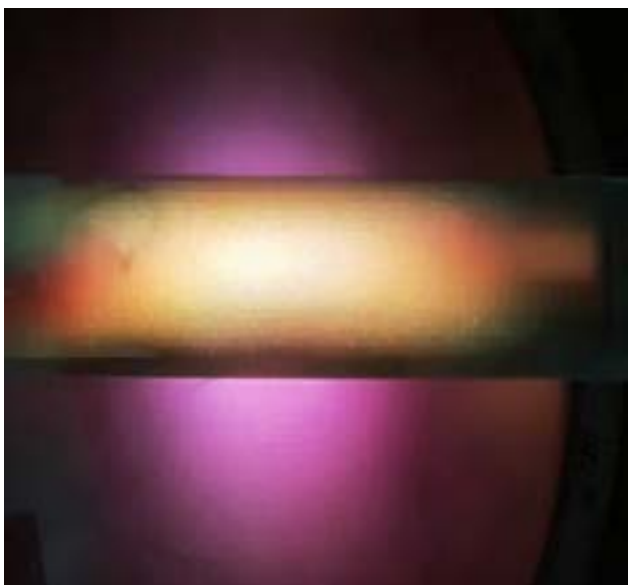


Рис. 4. Зовнішній вигляд зразка ПС 10×50×300 мм у полярископі (після стандартної полімеризації і додаткового відпалу при 100°C).

виходу ми повинні отримати чітку експоненційну залежність від відстані джерела до ФЕП. Але при наявності значних нерівномірностей в матеріалі реально виміряні показники відносного світлового

Таблиця 2

Різниця ходу та внутрішнє напруження в зразках ПС після стандартної полімеризації і додаткового відпалу при 100°C.

	Після відпалу		
	1,1	2,1	3,1
Різниця ходу, нм	60	60	115
внутрішнє напруження, МПа	0,55	0,55	1,0

виходу будуть значно відрізняються від показників очікуваних згідно експоненціальної залежності. Ступінь нерівномірності характеристик ПС можна оцінити за допомогою цих відхилень від експоненти (1, 2, 3).

Для зразків діаметром 50×1000 мм після стандартної полімеризації було виміряно відносний світловий вихід при різній відстані джерела випромінювання від ФЕП вздовж зразка ПС. Отримані точки на графіку апроксимовані експоненціальною кривою (рис. 2). На графіку можна спостерігати значне відхилення фактичних результатів від очікуваної залежності. Обчислене значення нерівномірності складо  $\Delta C = 18\%$ .

Із отриманих результатів можна зробити висновок, що наявність внутрішніх напружень дійсно викликає нерівномірність характеристик в ПС.

Для зменшення внутрішніх напружень в полістирольній полімерній основі ПС проводився

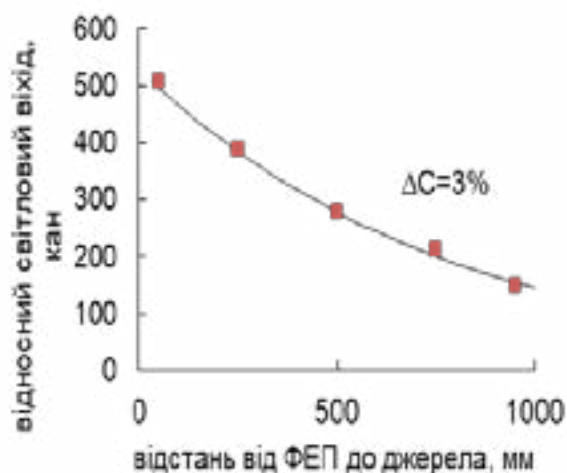


Рис.5. Залежність зменшення відносного світлового виходу при переміщенні джерела випромінювання вздовж зразка сцинтилятора діаметром 50×1000 мм після полімеризації та додаткового відпалу при 100°C.

відпал зразків сцинтиляторів при температурі 100°C. з наступним охолодженням зі швидкістю 2,5°C/год. Режим відпалу приведений на рис.3

Відпал було проведено для всіх зразків після чого було виміряно тіж самі характеристики, що і до відпалу. Так в аналізаторі полярископу після відпалу зразків можна спостерігати значне зменшення інтерференційного забарвлення (рис.4). Це свідчить про суттєве зменшення внутрішніх напружень в результаті відпалу зразка.

Різниця ходу та обчислені внутрішні напруження в зразках ПС після відпалу при 100°C наведені в таблиці 2.

Отримані данні свідчать про те, що в результаті відпалу зразків вдалося знизити внутрішні напруження в матеріалі більш ніж в 5 разів до значенн 0,55±1,0 МПа. Цей факт повинен сприятливо вплинути на рівномірність характеристик ПС.

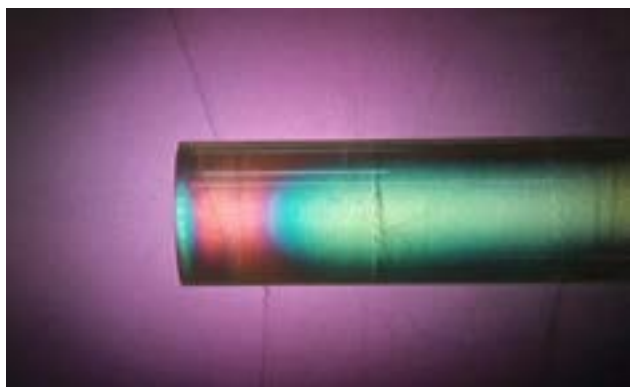
На рис.5 приведена залежність відносного світлового виходу при переміщенні джерела випромінювання вздовж зразка сцинтилятора

Таблиця 3.

Різниця ходу та внутрішнє напруження в зразках ПС виготовлених за стандартною технологією в алюмінієвій формі та в формі з антиадгезійним (композит на основі політетрафторетилену) покриттям.

	алюмінієва форма	форма з антиадгезійним покриттям
Різниця ходу, нм	300	70
внутрішнє напруження, МПа	2,7	0,6





а



б

Рис.6. Зовнішній вигляд в аналізаторі полярископу зразків ПС виготовлених за стандартною технологією в алюмінієвій формі (а) та в формі з антиадгезійним (композит на основі політетрафторетилену) покриттям (б).

додаткового відпалу при 100 °С. Можна бачити, що в цьому випадку отримані експериментальні дані набагато краще відповідають теоретичній експоненціальній залежності. Обчислена нерівномірність характеристики відносного світлового виходу складає  $\Delta C = 3\%$ , що знаходиться майже в межах похибки вимірювання.

Як згадувалося раніше одним із значних джерел виникнення напружень в полімерній основі ПС (особливо в поверхневому шарі заготовки сцинтилятора) є адгезія до стінок форми для полімеризації. Зазвичай для виготовлення ПС використовують форми виготовлені зі скла або алюмінію. Сляні форми використовуються для виготовлення відносно невеликих сцинтиляторів циліндричної форми. Для отримання довгомірних сцинтиляторів використовують зазвичай прямокутні форми з алюмінію. Полістирол має велику адгезію до алюмінієвих стінок форми, що при усадці полімеру призводить до виникнення значних внутрішніх напружень. Подібні напруження, як вже показано викликають нерівномірність характеристик ПС. Для нівелювання впливу цього недоліку авторами було запропоновано використання внутрішнього покриття форми для полімеризації матеріалом, що значно зменшує адгезію. Як такий матеріал обрано політетрафторетилен, який має необхідну термічну

стабільність та [12].

Було виготовлено ряд зразків ПС розміром діаметром 50×1000мм в однакових стандартних умовах в алюмінієвих формах та в формах з антиадгезійним (композит на основі політетрафторетилену) покриттям. За допомогою поляриметра встановлено середнє значення внутрішніх напружень для зразків отриманих в формах з покриттям та без нього (таблиця 3, рис.6)

Отримані значення внутрішніх напружень для різних типів форм (з покриттям та без) в 0,6 та 2,7МПа дуже близькі до результатів отриманих при дослідженні впливу відпалу на рівномірність характеристик ПС (0,55 та 2,9 МПа відповідно). Цей факт дозволяє сподіватися, що і нерівномірність сцинтиляційних характеристик при використанні форми для полімеризації з антиадгезійним покриттям зменшиться до розміру декількох відсотків. І дійсно нерівномірність розподілу відносного світлового виходу для зразків виготовлених в алюмінієвих ампулах складала  $\Delta C = 8 \div 6\%$ , а для зразків отриманих в ампулах з антиадгезійним покриттям цей показник зменшився і склав  $\Delta C = 3 \div 2\%$ .

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновано температурні режими відпалу для довгомірних заготовок пластмасових сцинтиляторів. Визначено, що додатковий відпал заготовок пластмасового сцинтилятора при температурі 100°С впродовж 12 годин зменшує неоднорідність розподілу відносного світлового виходу вздовж сцинтилятора до 3%.

2. Запропоновано антиадгезійне покриття на основі політетрафторетилену для полімеризації сцинтиляторів у металевих або скляних формах, яке знижує внутрішні напруження, обумовлені контактною адгезією між пластмасовим сцинтиляційним матеріалом та поверхнею форми. Це дозволяє зменшити неоднорідність розподілу відносного світлового виходу вздовж сцинтилятора до 3%.

## ЛІТЕРАТУРА

1. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN-LHCC-94-38, CERN-LHCC-P-1, printed in CERN, (1994), 450 p.
2. Design of Large Hadron Collider. CERN 91-03, printed in CERN, (1996), 270 p.
3. Tile Calorimeter. Technical Design Report, CERN-LHCC-96-42, CERN-LHCC-P-1, printed in CERN, (1996), 320 p.
4. T.A.Nepokupnaya, A.A.Ananenko, A.Yu.Boyarintsev, A.A.Bobovnikov, A.V.Gektin, S.N.Kovalchuk, Yu.D.Onufriyev, V.Yu.Pedash. Functional Materials, 24, 678 (2017) <https://doi.org/10.15407/fm24.04.678>.
5. E. W.Fischer, M.Dettenmaier. J. Non- Cryst. Solids, 31, 181

- (1978)
6. G.S.J Yeh, J. Macromol. Sci., B6, 465 (1972)
  7. P. Debye, A. M. Bueche. J. Appl. Phys., 20, 518 (1949)
  8. T. Kaino, M. Fujiki, K. Jinguji. Rev. Electr. Commun. Lab., 32, 478 (1984)
  9. Y. Koike. J. Macromol. Sci., 22, 1367 (1989) <https://doi.org/10.1021/ma00193a060>
  10. В.Г.Зубаков, К.В. Багдасарян., А.В. Кочикян, Изотропное рассеяние в аморфных полимерах. Свойства и применение оптически прозрачных материалов, Л. (1984), 356 с.
  11. П.М.Пахомов, А.И.Зубков, С.Д.Хижняк. Высокомолек. соедин, А, 40, 9, 1451 (1998).
  12. Б.В.Гринев, В.Г.Сенчишин, Пластмассовые сцинтилляторы, Акта, Х. (2003), 324 с.
  13. Sina Ebnesajjad, Expanded PTFE Applications Handbook, Technology, Manufacturing and Applications, Imprint: William Andrew. (2016), 300 p.
  14. Z.Foppl, E.Monch. Praktische Spannungsoptik, Berlin: Springer, (1972), 300 p.

#### REFERENCES

1. The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN-LHCC-94-38, CERN-LHCC-P-1, printed in CERN, (1994), 450 p.
2. Design of Large Hadron Collider. CERN 91-03, printed in CERN, (1996), 270 p.
3. Tile Calorimeter. Technical Design Report, CERN-LHCC-96-42, CERN-LHCC-P-1, printed in CERN, (1996), 320 p.
4. Т.А.Непокупная, А.А.Ананенко, А.Ю.Бояринцев, А.А.Бобовников, А.В.Гектин, С.Н.Ковалчук, Ю.Д.Онурьев, В.Ю.Педаш. Functional Materials, 24, 678 (2017) <https://doi.org/10.15407/fm24.04.678>.
5. E. W.Fischer, M.Dettenmaier. J. Non- Cryst. Solids, 31, 181 (1978)
6. G.S.J Yeh, J. Macromol. Sci., B6, 465 (1972)
7. P. Debye, A. M. Bueche. J. Appl. Phys., 20, 518 (1949)
8. T. Kaino, M. Fujiki, K. Jinguji. Rev. Electr. Commun. Lab., 32, 478 (1984)
9. Y. Koike. J. Macromol. Sci., 22, 1367 (1989) <https://doi.org/10.1021/ma00193a060>
10. V.G.Zubakov, K.B.Bagdasaryan, A.B.Kochikyan, Isotropic scattering in amorphous polymers. Properties and applications of optically transparent materials, L, (1984), 356 p. (In Russian).
11. P.M.Pakhomov, A.I.Zubkov, S.D.Khizhnyak. Macromolecular compounds, А, 40, 9, 1451 (1998). (In Russian).
12. B.V.Grinev, V.G.Senchishin. Plastic Scintillators, Acta, Kharkov (2003), 324 p. (In Russian).
13. Sina Ebnesajjad. Expanded PTFE Applications Handbook, Technology, Manufacturing and Applications, Imprint: William Andrew. (2016), 300 p.