

## СЕЛЕКТИВНИЙ МЕТОД ТВЕРДНЕННЯ ЕПОКСИДНИХ СПОЛУЧНИКІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТОНКОСТІННИХ ВИСОКОМІЦНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Т. А. Манько**

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

**ORCID: 0000-0003-4146-607X**

**К. Г. Сєдачова**

Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені

Олеся Гончара

**ORCID: 0000-0003-2226-6865**

**Х. В. Козіс**

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

**ORCID: 0000-0002-3739-9559**

В наступний час виробу ракетно-космічної техніки потребують використання матеріалів з високими питомими характеристиками. Селективний метод інфрачервоного нагрівання дозволяє забезпечити всі вимоги до композиту при значному скороченні часу процесу виготовлення. На підставі експериментальних досліджень за допомогою селективного методу інфрачервоного нагрівання були отримані зразки епоксидної композиції ЕДТ-10 + УП606/2(1%), які мають задовільну механічну міцність і компактність структури порівняно з матеріалом, який затверджував традиційним конвективним нагріванням. Аналіз отриманих результатів показав, що при високому ступені твердіння епоксидної композиції ЕДТ-10+УП606/2(1%) до 97% забезпечується зниженням енергоємності процесу та підвищення фізико-механічних характеристик матеріалу і їх стабільність. Для реалізації поставленої задачі розроблена установка для проведення експериментальних робіт із твердіння зразків епоксидної композиції селективним методом інфрачервоного нагрівання та обрані її основні параметри.

**Ключові слова:** епоксидний сполучник, полімер, ІЧ-опромінення, тверднення композиції, селективний метод, сольовий фільтр.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Процес твердіння виробів з полімерних композиційних матеріалів є однією із основних операцій. Пошук нових методів тверднення це використання фізичних полів при створенні виробів з композитів і це є актуальна задача використання економічно – ефективних технологій.

Відомо, що з метою енергозбереження, зниження собівартості, зменшення виробничих площ, захисту навколишнього середовища, тверднення тонкостінних конструкцій із композиційних полімерних матеріалів проводять з використанням інфрачервоного (ІЧ) нагрівання [1, 2].

Такий спосіб тверднення, якщо порівнювати з традиційним конвективним, призводить до підвищення фізико-механічних характеристик і забезпечує високу якість композиту.

Для зменшення енергоємності процесу в роботі проводили тверднення епоксидного сполучника, який використовується в тонкостінних конструкціях РКТ [3, 4]. Синтез реалізовували конвективним методом, ІЧ нагріванням та селективним ІЧ нагріванням [5]. У виробі ракетно-космічної техніки, для яких найсуттєвішим фактором є питома міцність, епоксидний сполучник є традиційним та неперевершеним матеріалом [6].

Як об'єкт дослідження застосовували епоксидний сполучник ЕДТ-10+УП606/2(1%) [7, 8], який добре пропускає ІЧ випромінювання в області довжин хвиль  $(2,7 - 4,0) \cdot 10^{-6}$  м за рахунок того, що оптичні властивості полімеру та спектральні характеристики випромінювача збігаються у цьому діапазоні довжин хвиль [9, 10]. Тверднення проводили на установці інфрачервоного нагрівання з використанням галогенних ламп розжарювання (ГЛР) типу КГТ-220-1000-1 [11]. Ці лампи розжарювання з кварцовими трубками мають невеликі розміри, проте

створюють високу концентрацію енергії (до  $40 \text{ Вт/см}^2$  по довжині трубки), володіють значним терміном служби (2000–5000 год), та малою термічною інерцією. Номінальний енергетичний потік досягається протягом  $\approx 0,6$  з моменту включення.

З метою передачі максимальної питомої потужності від випромінювача до поверхневого шару за допомогою ІЧ джерела з використанням сольових фільтрів були виділені смуги частот [12], у яких основна частина енергії, що випромінюється, припала на довжину хвилі  $(2,8 - 3,2) \cdot 10^{-6}$  м [13].

При розрахунку установок на передній план висувається визначення потужності генераторів ІЧ випромінювання, їх якості, розмірів і раціонального розташування в установці. Основними вимогами при визначенні енергетичних характеристик установок є забезпечення рівномірності опромінення поверхні матеріалу в процесі нагрівання до заданої температури. Розрахунок ІЧ установок проводять на основі диференціального рівняння теплового балансу, в якому енергія поглинається опромінюваним матеріалом за час  $dx$  витрачається на нагрівання ( $dQ_n$ ), віддачу тепла конвекцією ( $dQ_k$ ), випромінюванням ( $dQ_{\text{випр}}$ ) і на випаровування розчинників ( $dQ_{\text{випар}}$ ):

$$dQ = dQ_n + dQ_k + dQ_{\text{випр}} + dQ_{\text{випар}}. \quad (1)$$

Розташування ГЛР оптимізували в результаті аналізу енергетичних характеристик і полів опроміненості, створюваних як одиночними лампами, так і їх групою.

Розрахунок щільності опромінення ГЛР, проведений при допущенні про рівномірний розподіл температури по товщині матеріалу, показав, що одиночна лампа створює нерівномірне поле випромінювання як по довжині, так і в напрямку, перпендикулярному осі. Досягнення близької до рівномірної

опроміненості на значній площі забезпечується з'єднанням декількох ламп в групу.

При сумісній дії групи випромінювачів в результаті підсумовування кривих розподілу енергії одиначних ГЛР, створюється рівномірне поле опромінення, при цьому опроміненість збільшується в кілька разів. Зміна значень величини опроміненості досягається також регулюванням напруги живлення.

Застосування відбивачів з полірованих листів міді забезпечує створення необхідного ступеня рівномірності поля опромінення і збільшення значень опроміненості матеріалу.

Для реалізації поставленої задачі обрано основні параметри установки для проведення експериментальних робіт із тверднення зразків епоксидної композиції селективним методом інфрачервоного нагрівання (рис. 1) [14, 15].

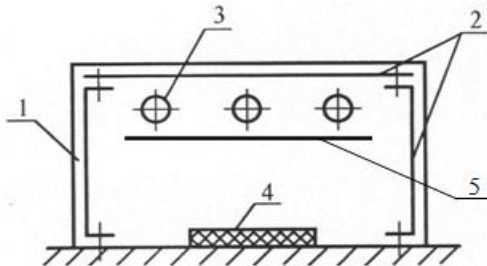


Рисунок 1 – Схема установки для ІЧ нагрівання:  
1 – корпус; 2 – відбивачі; 3 – галогенні лампи розжарювання; 4 – зразок; 5 – сольовий фільтр

Установка складається з корпусу 1, до верхньої та бічних поверхонь якого прикріплені відбивачі 2. Матеріалом відбивача був обраний мідний лист, відполірований до шорсткості  $Ra=5$ . Відомо, що відбивна здатність поверхні залежить від матеріалу та його шорсткості. Під верхнім відбивачем кріпили три галогенні лампи розжарювання 3, типу КГТ-220-1000-1. Зразок 4, що нагрівається, встановлювали в нижній частині корпусу. Сольовий фільтр 5 розташовували під галогенними лампами розжарювання на відстані, котра забезпечує температуру тверднення [16].

Інфрачервоне нагрівання нерозривно пов'язаний з конвективним, так як будь-яке джерело певну частину тепла передає за допомогою інфрачервоних променів, що називається радіаційною теплопередачею (РТ), а частину – шляхом конвекції (рис. 2).

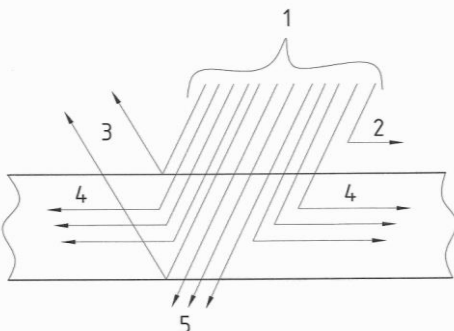


Рисунок 2 – Схема дії променів:  
1 – випромінюваний потік; 2 – енергія поглинання середовищем (конвекція); 3 – відбитий потік (конвекція); 4 – поглинена енергія; 5 – потік випромінювання, що пройшов крізь тіло

Такий механізм теплопередачі при інфрачервоному опроміненні суттєво відрізняється від механізму конвективного теплопереносу, в якому нагрівання матеріалу спрямований ззовні всередину, тобто температурний градієнт спрямований назустріч градієнту вологості і руху частинки розчинника і пластифікатора, уповільнюючи їх випаровування.

Під час розрахунку радіаційних лампових установок ІЧ нагрівання необхідно визначити витрати енергії та необхідну кількість ламп, використовуючи співвідношення:

$$E = \frac{\alpha \cdot \bar{S}}{A} \cdot (T_y - T_n), \quad (2)$$

де  $A$  – поглинальна здатність матеріалу;  $\alpha$  – сумарний коефіцієнт теплообміну;  $S$  – площа поверхні тіла;  $T$  – температура.

Енергетична освітленість та відстань між лампами  $e$  при розташуванні в «коридорному» порядку пов'язані співвідношенням:

$$E = \frac{P \cdot u \cdot \alpha}{e^2}, \quad (3)$$

де  $P$  – потужність лампи, Вт;  $u$  – коефіцієнт ефективності джерела;  $\alpha$  – коефіцієнт багаторазових відображень.

Коефіцієнт  $\alpha$  може бути визначений з виразу:

$$\alpha = \frac{1}{1 - P_k \cdot P_n \cdot \psi}, \quad (4)$$

де  $P_k$  – коефіцієнт відбиття камери;  $P_n$  – коефіцієнт відбиття поверхні тіла;  $\psi$  – частка потоку, що відбивається камерою.

Для відкритих лампових установок ІЧ нагрівання  $\alpha=1$ .

Витрату електроенергії на установку визначали за виразом:

$$\mathcal{E} = \frac{K \cdot E \cdot S_0}{\eta \cdot u \cdot \alpha}, \quad (5)$$

де  $P_n$  – коефіцієнт відбиття;  $S_0$  – площа поверхні, що опромінюється.

При режимі нагрівання, що встановився, ( $T=T_y=\text{const}$ ) все підведене тепло витрачається на компенсацію втрат у навколишнє середовище ( $\alpha \cdot Q_n=0$ ):

$$\frac{\mathcal{E} \cdot \eta \cdot u \cdot \alpha \cdot A}{K} = \alpha \cdot (T_y - T_o) \cdot \bar{S} \cdot S_0, \quad (6)$$

та витрата електроенергії визначається співвідношенням:

$$\mathcal{E} = \frac{K \cdot \alpha \cdot (T_y - T_o)}{\eta \cdot u \cdot \alpha \cdot A} \cdot S, \quad (7)$$

де  $K_\alpha$  – коефіцієнт теплового обміну;  $T_y$  – температура тіла;  $T_b$  – температура повітря;  $\eta$  – енергетичний к.к.д. = 0,70–0,75.

Чисельний розрахунок лампової установки для інфрачервоного нагрівання зразків склопластику при односторонньому опроміненні матеріалу, розміщеного на алюмінієвій підкладці, лампами КГТ-220-1000-1 проводили за таких вихідних даних:

- $A=0,9$ ;
- $\eta=0,7$ ;
- $K=1,1$ ;
- $\bar{S}=2$ ;
- $T_b=300\text{K}$ ;
- $T_y=420\text{K}$ ;
- $\rho=1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;
- $c=0,84 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ;
- $\alpha=18,35 \text{ Вт (м}^2\cdot\text{K)}$ ;
- $p=250 \text{ Вт}$ ;
- $u=0,7$ ;
- $a=1,07$ .

Витрата електроенергії на установці дала значення  $\mathcal{E}=572 \text{ Вт}$ .

Потік енергії, випромінюваний лампою, визначали потужністю лампи ( $P$ ) та її енергетичним ККД ( $\eta$ ):

$$\Phi_\lambda = \eta \cdot P. \quad (8)$$

Зазвичай  $\eta = 0,7 \div 0,75$ . Використовуючи цей вираз, визначили число ламп в установці ІЧ нагрівання залежно від площі об'єкта:

$$n = \Phi_n / \Phi_\lambda \cdot u \cdot a = E \cdot S_o / P_\eta \cdot u \cdot a, \quad (9)$$

де  $\Phi_\lambda$  – променистий потік від лампи;  $\Phi_n$  – потік променистої енергії;  $u$  – коефіцієнт ефективності джерела;  $a$  – коефіцієнт багаторазових відбиттів;  $E$  – енергетична освітленість;  $S_o$  – площа опромінюваної поверхні.

Розраховуючи необхідну кількість ламп, вводили коефіцієнт запасу  $K=1,1 \div 1,2$ .

Такий механізм теплопередачі при селективному методі ІЧ опромінення знижує енергоємність процесу, зберігаючи стабільно високі фізико-механічні характеристики [17].

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.** Як об'єкт дослідження використовували – епоксидний сполучник ЕДТ-10+УП606/2(1%) [18].

Цей експеримент проходив так [19, 20].

Для проведення експерименту були виготовлені зразки розміром  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$  з епоксидної композиції ЕДТ-10 (всього 15 зразків, по 5 на кожний режим) [21, 22].

Підготовлені зразки поміщали в установку для конвективного, ІЧ нагрівання та селективного ІЧ нагрівання. Процес тверднення проводили за такими режимами [23]:

1. Процес тверднення 5-и зразків №1 в печі конвективного нагрівання за наступними режимами:
  - вільний підйом до  $t^\circ=80^\circ\text{C}$ ;
  - витримка при  $t^\circ=80^\circ\text{C}$  – 3 години;

- вільний підйом до  $t^\circ=120^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=120^\circ\text{C}$  – 3 години;
- вільний підйом до  $t^\circ=160^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=160^\circ\text{C}$  – 1 година.

Загальний час склав – 7 годин.

2. Процес тверднення 5-и зразків №2 в установці ІЧ нагрівання:

- вільний підйом до  $t^\circ=80^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=80^\circ\text{C}$  – 1 година;
- вільний підйом до  $t^\circ=120^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=120^\circ\text{C}$  – 1 година;
- вільний підйом до  $t^\circ=160^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=160^\circ\text{C}$  – 30 хвилин.

Загальний час склав – 2 години 30 хвилин.

3. Процес селективного методу тверднення 5-и зразків №3 в установці ІЧ нагрівання з сольовим фільтром:

- вільний підйом до  $t^\circ=80^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=80^\circ\text{C}$  – 30 хвилин;
- вільний підйом до  $t^\circ=120^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=120^\circ\text{C}$  – 30 хвилин;
- вільний підйом до  $t^\circ=160^\circ\text{C}$ ;
- витримка при  $t^\circ=160^\circ\text{C}$  – 15 хвилин.

Загальний час склав – 75 хвилин.

Зразки, що затверділи за різними режимами, піддавали механічним випробуванням. Проводили 10 вимірювань мікротвердості для кожного зразка на установці ПМТ-3 при навантаженні 10 г і витримці протягом 15 с та визначали два параметри [24, 25]. Вимір мікротвердості проводили на 5-и зразках.

1. Мікротвердість за Віккерсом:

$$H_\mu = \frac{1854 \cdot 10}{(\Delta \cdot 0,307)^2} \left( \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right), \quad (10)$$

де  $\Delta$  – різниця довжини діагоналей піраміди.

2. Похибка вимірювань:

$$S = \sqrt{D}, \quad (11)$$

де  $D$  – дисперсія.

Результати вимірювань показали, що для зразків, які затверділи конвективним нагріванням, мікротвердість становить: зразок №1 –  $29,61 \text{ кгс/мм}^2$ ; при інфрачервоному нагріванні: зразок №2 –  $30,85 \text{ кгс/мм}^2$ ; при ІЧ селективному методі: зразок №3 –  $34,57 \text{ кгс/мм}^2$ .

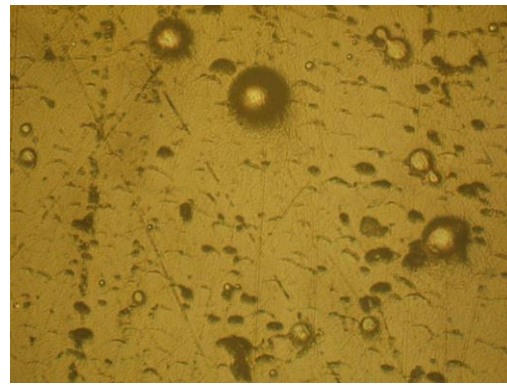
Аналіз отриманих результатів показав, що зразки, які затверділи селективним ІЧ методом протягом 75 хвилин, мають більш високу мікротвердість. Це підтверджує отримана компактна структура полімеру та висока ступінь полімеризації 97 % [26].

Результати металографічних досліджень, виконаних на мікроскопі ММ–8, показали, що в отриманих зразках епоксидної композиції за допомогою селективного ІЧ методу спостерігається компактна структура матеріалу (рис. 3, а). При конвективному методі тверднення структура неоднорідна (рис. 3, б).



x150

а)



x150

б)

Рисунок 3 – Структура епоксидної композиції ЕДТ-10:  
а – при селективному методі; б – при конвективному нагріванні

**ВИСНОВКИ.** В результаті проведеного дослідження встановлено, що з метою зниження енергоємності процесу тверднення епоксидної композиції ЕДТ-10+УП606/2(1%), рекомендується проводити селективним методом інфрачервоного нагрівання, який забезпечує рівномірність розподілу температури по всій оброблюваній поверхні, зберігаючи стабільні підвищені фізико-механічні характеристики. Даний метод дозволяє отримати більш високу мікротвердість, компактну структуру полімеру та високого ступеня тверднення 97 %. Значним показником вибору селективного методу є зменшення часу тверднення епоксидної композиції з 7 годин конвективним методом до 75 хвилин.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Манько Т. А. Прикладное материаловедение и технология конструкционных материалов. Днепропетровск : ДНУ, 2005. 150 с.
2. Манько Т. А., Кучма Л. Д., Губенко С. І. Спеціальне матеріалознавство. Дніпропетровськ, 2004. 215 с.
3. Технологія виробництва ракетно-космічних літальних апаратів : підручник / Ю. С. Алексєєв, О. Є. Джур, О. В. Кулик, Л. Д. Кучма, Є. Ю. Ніколенко, В. В. Хуторний. Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2007. 480 с.
4. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
5. Полімерні композиційні матеріали в ракетно – космічній техніці : підручник / Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько та ін. Київ : Вища освіта, 2003. 399 с.
6. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы : перевод с английского П. Г. Бабаевского, А. А. Грабильникова, С. Г. Кулика. Москва, 1980.
7. Карпинос Д. М. Новые композиционные материалы : уч. пос. –Київ : Высшая школа, 1977. 312 с.
8. Бондалетова Л. И., Бондалетов В. Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1) : учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 118 с.
9. Манько Т. А., Рыбалко А. В. Исследование механических характеристик композиций на основе полиэфирных связующих для получения тонкостенных высокопрочных конструкций. *Вісник ДУ. Ракетно-космічна техніка*. Вып. 14. Том 1. 2011. С. 86–88.
10. Composite materials handbook v. 1–3. Mil-hdbk-17-1f, milhdbk-17-2f, mil-hdbk-17-3f. 17 june 2002.
11. Копань В. С. Композиційні матеріали. Київ : Унів. вид-во «Пульсари», 2004. 200 с.
12. Светофильтры для пейзажной съёмки Uv-pass, hot mirror и инфракрасные светофильтры URL: <http://photo-element.ru/book/filters/ir/ir.html> (дата звернення: 03.09.2021).
13. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Берлина А. А. СПб : Профессия, 2009. 556 с.
14. Чернишов Є. О. Романов А. Д. Современные технологии производства изделий из композиционных материалов. *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 2. С. 46–51.
15. Композитні та порошкові матеріали : навчальний посібник / П. П. Савчук, В. П. Кашицький, М. Д. Мельничук, О. Л. Садова; за заг. ред. П. П. Савчука. Луцьк : Видавець: ФОП Теліцин О.В. 2017. 368 с.
16. Инфракрасные излучатели в туннельных печах URL: <https://polymernagrev.ru/nagrev-v-proizvodstve/infrakrasnye-izluchатели-v-tunnelnykh-pecakh.html> (дата звернення: 03.09.2021).
17. Перепелкин К. Е. Структура и свойства полимеров и полимерных материалов : их особенности, связанные с лазерными воздействиями. В кн. : Б. А. Виноградов, К. Е. Перепелкин, Г. П. Мещерякова. Действие лазерного излучения на полимерные материалы (Научные основы и прикладные задачи). СПб: Наука, 2006. Т. 1. 379 с.; Т. 2. 475 с. Часть 1. С. 17–124.
18. Кочнова З. А., Жаворонок Е. С., Чалых А. Е. Эпоксидные смолы и отвердители : промышленные продукты. Москва: ООО «Пэйнт-Медиа», 2006.
19. Технологія нагріву термопластичних композитів. ПЛАСТИКС №9 (138). 2014. С. 32–35. URL: <https://www.plastics.ru/pdf/journal/2014/09/Engel.pdf> (дата звернення: 03.09.2021).

20. Вишневикий Р. Н. Некоторые вопросы применения инфракрасного нагрева при полимеризации эпоксидных стеклопластиков. *Труды ЦНИИТС*, 1974. 140 с.

21. Чернин И. З., Смахов Ф. М., Жердев Ю. В. Эпоксидные полимеры и композиции. Москва: Химия, 1982.

22. Адаменко Н. А., Фетисов А. Ф., Агафонов Г. В. Конструкционные полимерные композиты : учеб. пособие. Волгоград : ВГТУ, 2010. 99 с.

23. Карпович О. И. Формообразование изделий из композиционных материалов. Лабораторный практикум. Минск : БГТУ, 2014. 122 с.

24. Технологические процессы испытания на прочность и герметичность в производстве ракетно-космической техники: учебн. для вузов / В. П. Вол-

ков, А. В. Кулик, А. Ф. Санин и др.; ред. Л. Д. Кучмы. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2014. 264 с.

25. Манько Т. А., Гусарова И. А., Самусенко А. А., Роменская О. П. Исследование механических свойств углепластиков с модифицированным наполнителем. *Научно-технический журнал «Технологические системы»*. 1 (82) / 2018. С. 21–25.

26. Копей Б. В., Манько Т. А., Роменская О. П., Гусарова И. А. Экспериментальные исследования характеристик углепластиковых элементов нефтепроводов в условиях, моделирующих эксплуатационные. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2019. Випуск №5. С. 123–129.

## SELECTIVE METHOD OF CURING EPOXY BINDERS FOR THE CREATION OF THIN-WALLED HIGH-STRENGTH STRUCTURES

**T. Manko**

Oles Honchar Dnipro National University

**ORCID: 0000-0003-4146-607X**

**K. Siedachova**

Rocket-and-Space Engineering College of Oles Honchar Dnipro National University

**ORCID: 0000-0003-2226-6865**

**K. Kozis**

Yuzhnoye State Design Office

**ORCID: 0000-0002-3739-9559**

**Purpose** To improve the physical and mechanical characteristics of the epoxy composition, reduce energy consumption, cost, reduce production areas, as well as protect the environment, for the hardening thin-walled structures made of polymer composite materials, it is necessary to choose the most rational method for curing polymer composite materials. **Methodology** The prepared samples of the epoxy binder ЭДТ-10+УП606/2(1%) with a size of 10x10x10 mm, were hardened by convective, IR heating, and selective IR heating according to specified modes. IR heating is provided by unit with three halogen incandescent lamps type КГТ-220-1000-1 inside and using a salt filter. The mode of composition hardening according to three technologies has been developed. **Findings** The results of measurements of the cured samples showed that the highest microhardness was achieved using selective IR heating. Metallographic studies has shown that polymer obtained a compact structure with a high degree of hardening, approximately 97%. Hardened samples of ЭДТ-10 epoxy binder were subjected to mechanical tests. Having determined the microhardness, it was found that during the selective hardening of the ЭДТ-10 binder, the microhardness was 34,57 kgf/mm<sup>2</sup>, IR heating - 30,85 kgf/mm<sup>2</sup>, convective heating – 29,61 kgf/mm<sup>2</sup>. **Originality** To obtain the maximum specific power from the IR emitter, salt filters were used, in which the main part of the emitted energy fell on the wavelength  $(2,8 - 3,2) \cdot 10^{-6}$  m. This technique allows you to select the necessary frequency bands. **Practicalvalue** The results of epoxy composition samples hardening experiment showed that the hardening process by the IR heating selective method takes 1 hour and 15 minutes, in contrast to convective heating which requires at least 7 hours and IR heating with 2 hours and 30 minutes. The selective method provides a uniform temperature distribution over the entire surface to be treated, which ensures high physical and mechanical characteristics. **Conclusions** On the basis of experimental researches with help selective method IR of hardening samples from PCM have been received on the basis of epoxy binding which possess high mechanical durability and compact structure in comparison with a composition which hardening a traditional convection heating.

**Key words:** epoxy binding, polymer, the IR-irradiation, hardening compositions, selective method, salt filter.

### REFERENCES

1. Manko, T. A. (2005). *Prykladnoe materyalovedenye y tekhnolohiya konstruktsyonnykh materyalov*. [Applied Materials Science and Technology of Structural Materials]. Dnepropetrovsk, 150 p. [in Russian]

2. Manko, T. A., Kuchma, L. D., Hubenko, S. I. (2004). *Spetsialne materialoznavstvo* [Special materials]. Dnipropetrovsk, 215 p. [in Ukrainian]

3. *Tekhnolohiia vyrobnytstva raketno-kosmichnykh litalnykh aparativ* [Technology of production of rocket and space aircraft]: pidruchnyk / Yu. S. Aleksiev, O.

Ie. Dzhur, O. V. Kulyk, L. D. Kuchma, Ye. Iu. Nikolenko, V.V. Khutoryni. Dnipropetrovsk. 2007. 480 p. [in Ukrainian]

4. Kablov, E. N. (2012). *Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda* [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. № 5, pp. 7–17. [in Russian]

5. *Polimerni kompozytsiini materialy v raketno – kosmichnii tekhnitsi* [Polymeric composite materials in

- rocket and space technology]: pidruchnyk / Ye. O. Dzhur, L. D. Kuchma, T. A. Manko ta in. Kyiv. 2003. 399 p. [in Ukrainian]
6. Richardson, M. (1980). Promyshlennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy perevod s angliyskogo [Industrial polymer composite materials] / translation from English P. G. Babayevskogo. A. A. Grabilnikova. S. G. Kulika. Moskva. [in Russian]
7. Karpynos, D. M. (1977). Novyye kompozytsyionnyye materialy [New composite materials]: uch. pos. Kyiv. 312 p. [in Russian]
8. Bondaletova, L. I., Bondaletov, V. G. (2013). Polimernyye kompozitsionnyye materialy (chast 1): uchebnoye posobiye [Polymer composite materials (part 1)]. Tomsk, 118 p. [in Russian]
9. Manko, T. A., Rybalko, A. V. (2011). Issledovaniye mekhanicheskikh kharakteristik kompozitsiy na osnove poliefirnykh svyazuyushchikh dlya polucheniya tonkostennykh vysokoprochnykh konstruktsiy [Investigation of the mechanical characteristics of compositions based on polyester binders for obtaining thin-walled high-strength structures]. *Visnik DU. Raketno-kosmichna tekhnika*. Vyp. 14. Tom 1, pp. 86–88. [in Ukrainian]
10. Composite materials handbook v. 1–3. Mil-hdbk-17-1f, mil-hdbk-17-2f, mil-hdbk-17-3f. 17 june 2002. [in English]
11. Kopan, V. S. (2004). Kompozytsiini materialy [Composite materials] Kyiv, 200 p. [in Ukrainian]
12. Svetofyltru dlia peizazhnoi siemky Uv-pass, hot mirror y ynfrakrasnye svetofyltru [filters for landscape photography]. URL: <http://photoelement.ru/book/filters/ir/ir.html>. [in Russian]
13. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology] / pod red. A. A. Berlina. SPb. 2009. 556 p. [in Russian]
14. Chernishov, E. O., Romanov, A. D. (2014). Sovremennyye tekhnologii proizvodstva izdeliy iz kompozitsionnykh materialov / Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. [Modern technologies for the production of products from composite materials / Modern high technologies]. № 2, pp. 46–51. [in Russian]
15. Kompozytni ta poroshkovi materialy: navchalnyi posibnyk [Composite and powder materials: a textbook] / P. P. Savchuk, V. P. Kashytskyi, M. D. Melnychuk, O. L. Sadova; za zah. red. P. P. Savchuka. Lutsk. 2017. 368 p. [in Ukrainian]
16. Infrakrasnyye izluchately v tunnelnykh pechakh [Infrared emitters in tunnel ovens] <https://polymernagrev.ru/nagrev-v-proizvodstve/infrakrasnye-izluchately-v-tunnelnykh-pechakh/> [in Russian]
17. Perepelkin, K. E. (2006). Struktura i svoystva polimerov i polimernykh materialov: ikh osobennosti. svyazan-nyye s lazernymi vozdeystviyami [The structure and properties of polymers and polymeric materials: their features associated with laser exposure]. V kn.: B. A. Vinogradov, K. E. Perepelkin, G. P. Meshcheryakova. Deystviye lazernogo izlucheniya na polimernyye materialy (Nauchnyye osnovy i prikladnyye zadachi). SPb. T. 1. 379 p.; T. 2. 475 p. Chast 1. pp. 17–124. [in Russian]
18. Kochnova, Z. A., Zhavoronok, E. S., Chalykh, A. E. (2006). Epoksidnyye smoly i otverditeli [Epoxy resins and hardeners: industrial products]: promyshlennyye produkty. Moskva. [in Russian]
19. Tekhnologiya nagreva termoplastichnykh kompozitov [Thermoplastic composites heating technology]. *PLASTIKS* №9 (138) 2014. pp. 32–35. URL: <https://www.plastics.ru/pdf/journal/2014/09/Engel.pdf> [in Russian]
20. Vishnevskiy, R. N. (1974). Nekotoryye voprosy primeneniya infrakrasnogo nagreva pri polimerizatsii epoksidnykh stekloplastikov [Some questions of the use of infrared heating in the polymerization of epoxy fiberglass]. *Trudy TsNIITS*. 140 p. [in Russian]
21. Chernyn, Y. Z., Smekhov, F. M., Zherdev, Yu. V. (1982). Epoksydnye polymeru y kompozytsyy. [Epoxy polymers and compositions]. Moskva. [in Russian]
22. Adamenko, N. A. (2010). Konstruktsionnyye polimernyye kompozity [Structural polymer composites]: ucheb. posobiye / N. A. Adamenko. A. F. Fetisov. G. V. Agafonova. Volgograd. 99 p. [in Russian]
23. Karpovych, O. Y. (2014). Formoobrazovanye yzdelyi yz kompozytsyonnykh materialov. Laboratorniy praktikum. [Forming products from composite materials]. Mynsk. 122 p. [in Russian]
24. Tekhnologicheskiye protsessy ispytaniya na prochnost i germetichnost v proizvodstve raketno-kosmicheskoy tekhniki [Technological processes for testing strength and tightness in the production of rocket and space technology]: uchebn. dlya vuzov / V. P. Volkov. A. V. Kulik. A. F. Sanin i dr.; red. L. D. Kuchmy. Dnepropetrovsk. 2014. 264 p. [in Russian]
25. Manko, T. A., Gusarova, I. A., Samusenko, A. A., Romenskaya, O. P. (2018). Issledovaniye mekhanicheskikh svoystv ugleplastikov s modifitsirovannym napolnitelem [Investigation of the mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics with modified filler]. *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal «Tekhnologicheskiye sistemy»*. Kiyev. 1(82)/2018, pp. 21–25. [in Russian]
26. Kopey, B. V., Manko, T. A., Romenskaya, O. P., Gusarova, I. A. (2019). Eksperimentalnyye issledovaniya kharakteristik ugleplastikovykh elementov nefteprovodov v usloviyakh. modeliruyushchikh ekspluatatsionnyye [Experimental studies of the characteristics of carbon fiber elements of oil pipelines under conditions that simulate operational]. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*. Vipusk № 5, pp. 123–129. [in Ukrainian]