

## РАДІАЦІЙНА ОБРОБКА В ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ІЗ СКЛОПЛАСТИКІВ

**Мета роботи.** Метою роботи є інтенсифікація процесів твердіння тонкостінних склопластиків конструкційного та теплозахисного призначення й підвищення їх фізико-механічних характеристик за допомогою радіаційних методів обробки.

**Методи дослідження.** Досліджувалися склопластики конструкційного та теплозахисного призначення. В якості наповнювача використовували кремнеземну склотканину КТ-11-ТОВА, яка була піддана термообробці та апретуванню [5]. В якості сполучного матеріалу застосовували епоксидну смолу ЕДТ-10 та фенолоформальдегідну смолу ЛБС-4. Радіаційну обробку прискореними електронами проводили на прискорювачі типу ЕЛТ-1,5. Для реалізації інфрачервоного нагріву використовували галогенні лампи розжарювання КГТ-220-1000, які розташовувались «коридором» для забезпечення рівномірного температурного поля [2]. Розривні навантаження вимірювали на розривній машині МР-0,5-1 при швидкості навантаження 50 мм/хв. Електронно-мікроскопічний аналіз здійснювали на електронному мікроскопі РЕМ 200.

**Наукова новизна.** Запропоновано й досліджено методи радіаційного впливу на процеси формування внутрішньої структури склопластиків і встановлено, що радіаційна обробка є ефективним способом спрямованої зміни структури і властивостей полімерів та інтенсифікації процесів твердіння композитів. Результатами досліджень підтверджено факт інтенсифікації процесу твердіння склопластиків за рахунок застосування радіаційного опромінення в порівнянні з конвективним нагріванням. Встановлено, що радіаційна обробка комбінованим методом забезпечує підвищення показників міцності для склопластиків теплозахисного й конструкційного призначення до 18 % та 20 % відповідно.

**Практична цінність.** Розроблено технологію радіаційної обробки комбінованим методом склопластиків теплозахисного й конструкційного призначення, що включає інфрачервоне нагрівання та доотвердіння прискореними електронами. Для повного завершення процесу час прогрівання при радіаційній обробці прискореними електронами складає 1 хв, а при комбінованому методі – 16 хв. Загальний час термотвердіння при конвективному нагріванні складає 8 годин. Результати експериментальних досліджень були використані для удосконалення технологічних процесів твердіння склопластиків теплозахисного та конструкційного призначення.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, склопластик, інтенсифікація процесу затвердіння, прискорені електрони, інфрачервоний нагрів, джерело електронів.

### Вступ

У даний час у машинобудуванні широкого застосування одержали склопластики, які успішно конкурують із металами та їх сплавами. Вироби із них мають малу питому вагу й малу гігроскопічність.

Існуюча технологія виготовлення виробів із склопластиків є трудомістким процесом, пов'язаним із тривалістю твердіння останніх. Способи інтенсифікації процесів твердіння вимагають спеціальних досліджень і нестандартних рішень.

Одним із таких рішень є використання радіаційних методів твердіння композитів. Дослідження цих методів є актуальною задачею та має велике практичне значення.

Застосування радіаційних методів обробки склопластиків у процесі твердіння дозволяє значно скоротити цикл виготовлення виробів, знизити трудомісткість процесів і підвищити експлуатаційні характеристики одержуваних матеріалів.

### Методика досліджень

Досліджувалися склопластики конструкційного та теплозахисного призначення. В якості наповнювача використовували кремнеземну склотканину КТ-11-ТОВА, яка була піддана термообробці та апретуванню. В якості сполучного матеріалу застосовували епоксидну смолу ЕДТ-10 та фенолоформальдегідну смолу ЛБС-4.

Спосіб формування виробів із полімерних композиційних матеріалів включає три основних етапи, на першому з яких здійснюється попереднє формування, потім конструкція піддається нагріву з метою твердіння сполучного матеріалу, а на остаточному етапі виріб доводиться до потрібної форми і розмірів.

Заготовки склопластиків конструкційного та теплозахисного призначення формували методом контактного пресування та на намотувальних верстатах типу ВНП-6.

При контактному пресуванні для виготовлення склопластикових пакетів використовували оснащення,

яке представляє собою два обкладених листа з алюмінію завтовшки 10 мм і площею 400×400 мм<sup>2</sup>. Антіадгезією була фторопластова плівка.

Рівномірний тиск формування  $P\phi = 0,5$  МПа створювали гідравлічним пресом і контролювали манометром, а однакову товщину пакетів забезпечували стяжкою болтів по периметру обкладених листів до упору до шаблону. Матеріал ущільнювали виходячи із розрахунку 4 шари препрегу на 1 мм товщини пакета.

Зразки циліндричної форми виготовляли методом «мокрого» намотування на оправленні з алюмінію діаметром 300 мм. Формування оболонки проводили на намотувальному верстаті з ЧПК типу СНП-6 і на лабораторній установці для виготовлення мікропластиків. При формуванні оболонки застосовували кругове намотування в напрямку, перпендикулярному утворенню циліндра (кут намотування близький до 90°). Сполучне перед намотуванням нагрівали до температури 340 К для забезпечення необхідної в'язкості. Товщина оболонки становить 0,5–10 мм.

Готові зразки поміщали на транспортер, ширина стрічки якого 380 мм і простягали або обертали під прискорювачем. В результаті чого вони послідовно потрапляли у зону випускного вікна прискорювача та опромінювалися паралельним пучком електронів.

Для твердіння сполучного в роботі розглянуті наступні способи нагріву: використання конвективного нагріву, інфрачервоного нагріву та комбінований спосіб нагріву, який включає інфрачервоний нагрів і доотвердіння прискореними електронами.

Радіаційну обробку прискореними електронами проводили на прискорювачі типу ЕЛТ-1,5 при наступних режимах: енергія електронів, МеВ – 1,5; потужність дози випромінювання, Мрад – 2,33; поглинена доза, Мрад – 20, 40, 60, 80, 100; ток пучка, мА – 7. Формування пучка, діаметр якого на виході складає 5 мм, забезпечували системою магнітних лінз. Для розподілу падаю-

чої енергії по площі застосовувалася магнітна система розгортки пучка в двох взаємно напрямках.

Для порівняльних випробувань використовували контрольні зразки, термотвердіння (ТО) яких проводили по режиму: підйом температури до 350 К протягом 2 годин, плавне підвищення температури від 350 К до 430 К протягом 4 годин і витримка при температурі 430 К протягом 2 годин із наступним вільним охолодженням в печі. Загальний час термотвердіння склало 8 годин.

Розривні навантаження вимірювали на розривній машині МР-0,5-1 при швидкості навантаження 50 мм/хв.

Для реалізації інфрачервоного нагріву використовували галогенні лампи розжарювання КГТ-220-1000, які розташовувались «коридором» для забезпечення рівномірного температурного поля.

В роботі досліджували можливість застосування радіаційного твердіння прискореними електронами при отриманні склопластиків конструкційного та теплозахисного призначення товщиною 4 мм.

### Результати досліджень

Дослідження проводили із метою відпрацювання режимів твердіння. Оскільки, кінцевою задачею є одержання стабільно високих фізико-механічних характеристик було вивчено вплив дози опромінення (20 Мрад, 40 Мрад, 60 Мрад, 80 Мрад, 100 Мрад) на зміну міцності зсуву зразків склопластику. Час опромінення склав 1 хв. У таблиці 1 наведені фізико-механічні характеристики склопластиків при різних дозах опромінення.

З метою оцінки адгезійної міцності між шарами склопластику при радіаційному твердінні виготовляли плоскі зразки для вимірювання зсувної міжшарової деформації, що представляють собою склеєні «внахлест» смужки препрегу розміром (120×20) мм із перекриттям 25 мм. Розривні напруження вимірювали на розривній машині МР-0,5-1 при швидкості навантаження 50 мм/хв. На рис. 1а, б наведені гістограми зміни характеристик міцності плоских склопластиків.

**Таблиця 1** – Дані фізико-механічних випробувань плоских зразків склопластику отвердженого прискореними електронами

Матеріал	Спосіб твердіння	Поглинен а доза, Мрад	Фізико-механічні властивості				
			Густина, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Ступінь твердіння, %	Руйнівні навантаження		
					$\sigma_{зг}$ , МПа	$\sigma_{рос}$ , МПа	$\sigma_{ст}$ , МПа
КТ-11-ТОА+ЛБС-4	РО	20	1,19	98,3	89,3	342	248,3
		40	1,21		90,8	365	250,9
		60	1,25		92,5	387	253,3
		80	1,28		111,0	412	298,0
		100	1,30		111,8	429	298,6
	ТО	0	1,23	97,0	98,0	375	280,0
КТ-11-ТОА+ЕДТ-10	РО	20	1,21	98,5	123,7	486	323,6
		40	1,24		125,5	504	326,4
		60	1,27		127,7	527	328,9
		80	1,30		130,7	547	345,8
		100	1,31		131,2	548	346,2
	ТО	0	1,25	97,5	112,7	475	342,7

З таблиці видно, що максимальне збільшення міцності спостерігається при дозі опромінення 80 Мрад. Подальше збільшення дози опромінення недоцільно через необхідність застосування обладнання з більш високою енергією прискорених електронів. Ступінь твердіння радіаційнооброблених зразків при дозі 80 Мрад склала 98,3 % для ЛБС-4 та 98,5 % для ЕДТ-10, що свідчить про досить високу завершеність хімічного процесу.

Розривна міцність зразків, які були піддані радіаційній обробці (РО), склала 412 МПа для КТ-11-ТОА+ЛБС-4 та 547 МПа для КТ-11-ТОА+ЕДТ-10; контрольних зразків (ТО) – 375 МПа та 475 МПа відповідно.

За результатами фізико-механічних випробувань встановлено, що в склопластиках теплозахисного призначення, які були піддані радіаційній обробці за вказаними режимами, спостерігається збільшення характеристик міцності на 13 %, а в склопластиках конструкційного призначення при цих же режимах твердіння характеристики міцності збільшуються на 15 %.

Для одержання стабільного збільшення характеристик міцності склопластиків у роботі була запропоновано схему комбінованого твердіння, що включає інфрачервоне нагрівання (ІЧ) й доотвердіння прискореними електронами (РО). Необхідність застосування комбіно-

ваного твердіння викликана тим, що для склопластиків на сполучних поліконденсаційного типу м'яке інфрачервоне нагрівання забезпечує більш повне та якісне видалення летких речовин.

Для реалізації комбінованого способу інфрачервоне нагрівання тонкостінних склопластиків здійснювали при температурі 390 К протягом 15 хв. Потім зразки, що піддавалися попередньому термоотвердінню за допомогою інфрачервоного нагрівання, доотверджували на прискорювачі електронів при дозі опромінення 80 Мрад протягом 1 хв. при температурі твердіння 423К.

Результати фізико-механічних випробувань зразків представлені в таблиці 2.

На гістограмі (рис. 2а, б) наведено показники міцності плоских зразків при різних способах твердіння.

Механічні випробування плоских заготовок, отверджених комбінованим способом (ІЧ+РО), показали, що розривна міцність склопластику на ЛБС-4 становить 458 МПа, а на ЕДТ-10 – 595 МПа. Для заготовок, отверджених конвективним нагріванням (ТО) – 375 і 475 МПа відповідно. Ступінь твердіння для ЛБС-4 становила 98,7%, а для ЕДТ-10 – 98,9%. При цьому відбувалося скорочення часу твердіння з 8 годин до 16 хв.

Електронно-мікроскопічний аналіз здійснювали на електронному мікроскопі РЕМ 200 при напрузі 40 кВ. На рис. 3 представлені результати електронно-мікроскопічних досліджень сполучного ЛБС-4.

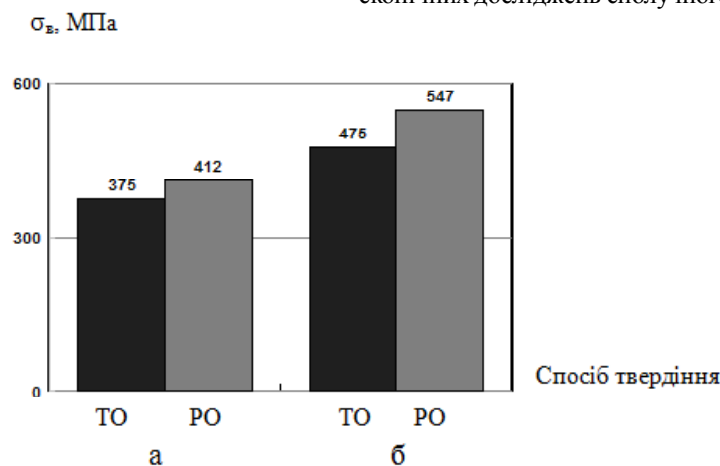


Рис. 1. Гістограми характеристик міцності плоских склопластиків: а – конструкційного призначення; б – теплозахисного призначення

Таблиця 2 – Фізико-механічні характеристики склопластику отвердженого радіаційними методами і контрольним методом

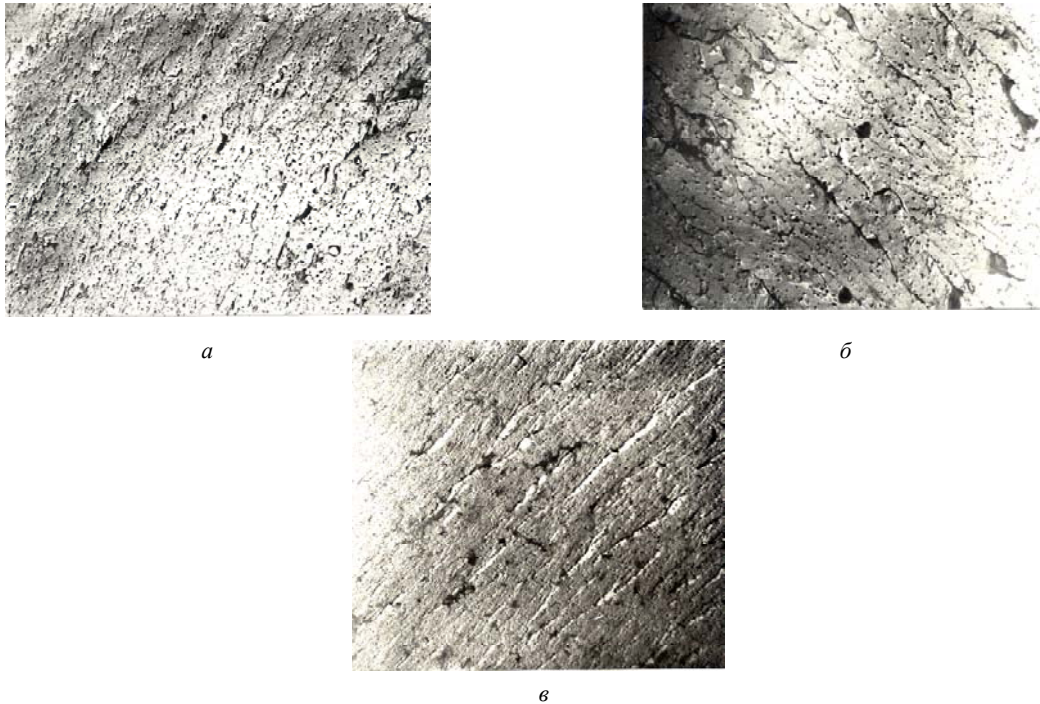
Матеріал	Спосіб твердіння	Густина ρ, кг/м <sup>3</sup>	σ <sub>r</sub> , МПа	Ступінь твердіння, %	Кількість зразків
КТ-11-ТОА+ЛБС-4	ТО	1,23	375	97,0	11
	РО	1,28	412	98,3	11
	ІЧ	1,31	441	98,5	11
	ІЧ+РО	1,33	458	98,7	11
КТ-11-ТОА+ЕДТ-10	ТО	1,25	475	97,5	11
	РО	1,30	547	98,5	11
	ІЧ	1,32	583	97,7	11
	ІЧ+РО	1,34	595	98,9	11

В результаті вивчення надмолекулярної структури сполучного ЛБС-4 встановлено, що в зразках, підданих радіаційному впливу прискореними електронами спостерігається незначне збільшення пористості (рис. 3б) в порівнянні з конвективним нагріванням (рис. 3а), викликане продуктами радіолізу. Кількість же пор в матеріалі, отвердженому комбінованим методом зменшується (рис. 3в), так як при попередньому інфрачервоному нагріві сполучного ЛБС-4 відбувається часткове вида-

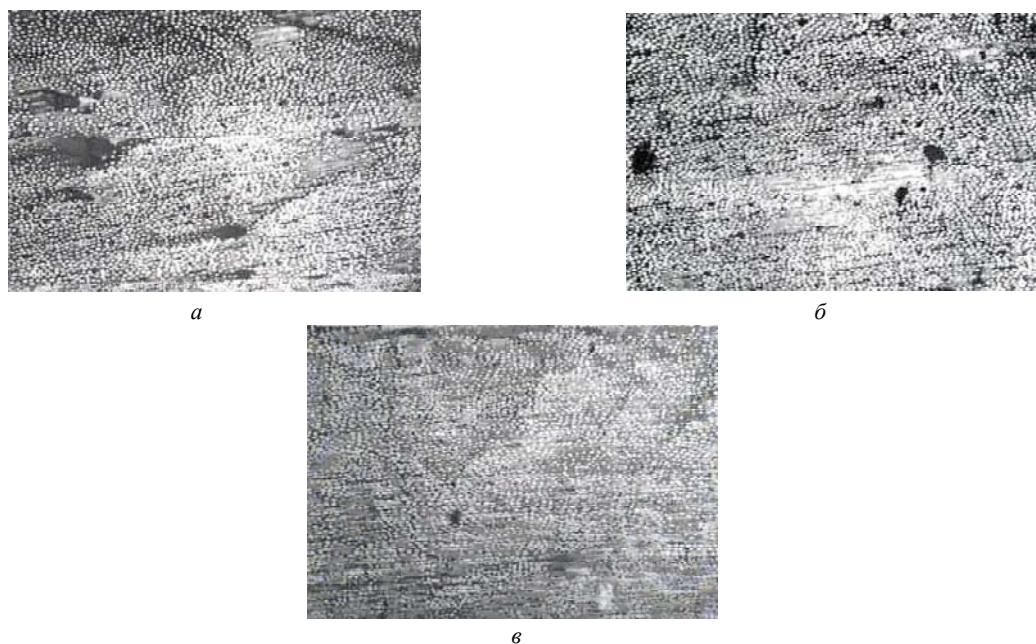
лення летких речовин. Підвищення якості композиту призводить до збільшення фізико-механічних характеристик.

Аналогічна картина простежується в зразках склопластику на цьому ж сполучному (рис. 4).

Більша кількість пор спостерігається в зразках склопластику, отвердженого прискореними електронами. І ця кількість пор істотно зменшується, структура стає більш компактною при комбінованому способі твердіння.



**Рис. 3.** Електронно-мікроскопічні дослідження сполучного ЛБС-4: *а* – контрольний зразок; *б* – радіаційна обробка прискореними електронами; *в* – комбіноване твердіння



**Рис. 4.** Мікроструктура склопластику КТ-11-ТОА + ЛБС-4: *а* – контрольний зразок; *б* – радіаційна обробка прискореними електронами; *в* – комбіноване твердіння

Механізм виявлених явищ полягає в наступному. Оскільки теплопровідність композиту низька, при конвективній обробці він нагрівається послідовно від поверхні до центра заготовки, відповідно до цього після нагрівання до заданої температури починається твердіння композиту. Виникаючий градієнт температур по перерізу заготовки поступово зменшується, подовжуючи як час наскрізного прогрівання, так і тривалість процесу твердіння.

При радіаційній обробці працюють два механізми. При впливі на композит інфрачервоного випромінювання інтенсифікація процесу отвердження відбувається через вплив кванта енергії на протікання хімічних реакцій між макромолекулами, тобто виникають фотохімічні процеси взаємодії.

При радіаційній обробці прискореними електронами також відбувається взаємодія випромінювання з речовиною. У результаті процесів поглинання, які приводять до іонізації та збудження атомів, прискорені електрони створюють потік вторинних електронів і випромінювання квантів енергії при переході атомів в основний стан. Ці явища сприяють розігріву композита. Процес супроводжується генеруванням гальмового випромінювання рентгенівського діапазону в результаті пружного розсіювання прискорених електронів на ядрах атомів.

У роботі розглянути процеси радіаційного впливу на склопластики при передачі тепла усередину матеріалу.

### Висновки

Як показали результати досліджень, застосування радіаційних методів обробки із урахуванням розподілу температурних полів дозволяє удосконалити технологію виготовлення виробів із композиційних матеріалів та рекомендувати її для формування елементів конструкцій оболонкової і плоскої форми. Виходячи із отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

- досліджено вплив дози опромінення (20 Мрад, 40 Мрад, 60 Мрад, 80 Мрад, 100 Мрад) на зміну зсувної міцності зразків склопластику. Встановлено, що макси-

мальне збільшення міцності спостерігається при дозі опромінення 80 Мрад;

- за результатами фізико-механічних досліджень встановлено, що в склопластиках теплозахисного призначення (КТ-11-ТОА+ЛБС-4), які піддавалися радіаційній обробці прискореними електронами при дозі опромінення 80 Мрад, спостерігається збільшення характеристик міцності композита до 13 %, а в склопластиках конструкційного призначення (КТ-11-ТОА+ЭДТ-10) при цих же режимах твердіння до 15 % порівняно з конвективним нагріванням;

- розроблено нову технологію комбінованого твердіння склопластиків, яка включає інфрачервоне нагрівання й доотвердження прискореними електронами. При цьому відбувається значне скорочення тривалості твердіння (з 8 год до 16 хв) і збільшення показників міцності до 20 % порівняно з твердінням конвективним нагріванням;

- мікроскопічний і електронно-мікроскопічний аналізи дозволили установити, що кількість пор у склопластику залежить від способу твердіння. Найменше число пор спостерігається в зразках, які отверджені комбінованим способом.

### Список літератури

1. Манько Т. А. Современное материаловедение. Учебное пособие / Манько Т. А. – Днепропетровск : ДНУ, 2007. – 199 с.
2. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці : підручник / [С. О. Джур, Л. Д. Кучма, Т. А. Манько та ін.]. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.
3. температуры и спектрального состава ИК излучения при производстве многослойной термостойкой пленки / [Каиров Э. И., Слободской А. П., Марков Н. Г. и др.] Выбор // Пластические массы. – 1990. – № 7. – С. 62-64.
4. Зворыкин Д. Б., Прохоров Ю. И. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности / Зворыкин Д. Б., Прохоров Ю. И. – М. : Энергия, 1980. – 156 с.
5. Адгезия связующих к стекловолоконистым наполнителям при радиационном отверждении / [Омельченко С. И., Шлопацкая В. В.] // Пластические массы. – 1980. – № 8. – С. 30–33.

Одержано 14.02.2019

### Задоя Н.А., Рудык Н.Г. Радиационная обработка в технологии изготовления изделий из стеклопластиков

**Цель работы.** Целью работы является интенсификация процессов отверждения тонкостенных стеклопластиков конструкционного и теплозащитного назначения и повышения их физико-механических характеристик с помощью радиационных методов обработки.

**Методы исследования.** Исследовались стеклопластики конструкционного и теплозащитного назначения. В качестве наполнителя использовали кремнеземную стеклоткань КТ-11-ТОА, которая была подвергнута термообработке и аппретирования [5]. В качестве связующего материала применяли эпоксидную смолу ЭДТ-10 и фенолоформальдегидную смолу ЛБС-4. Радиационную обработку ускоренными электронами проводили на ускорителе типа ЭЛТ-1,5. Для реализации инфракрасного нагрева использовали галогенные лампы накаливания КГТ-220-1000, которые располагались «коридором» для обеспечения равномерного температурного поля [2]. Разрывные нагрузки измеряли на разрывной машине МР-0,5-1 при скорости нагрузки 50 мм/мин. Электронно-микроскопический анализ осуществляли на электронном микроскопе РЭМ 200.

**Научная новизна.** Предложены и исследованы методы радиационного воздействия на процессы формирования внутренней структуры стеклопластиков и установлено, что радиационная обработка является эффективным способом направленного изменения структуры и свойств полимеров и интенсификации процессов отверждения композитов. Результатами исследований подтвержден факт интенсификации процесса отверждения стеклопластиков за счет применения радиационного облучения по сравнению с конвективным нагревом. Установлено, что радиационная обработка комбинированным методом обеспечивает повышение показателей прочности для стеклопластиков теплозащитного и конструкционного назначения в 18 % и 20 % соответственно.

**Практическая ценность.** Разработана технология радиационной обработки комбинированным методом стеклопластиков теплозащитного и конструкционного назначения, включая инфракрасный нагрев и доотверждение ускоренными электронами. Для полного завершения процесса время прогрева при радиационной обработке ускоренными электронами составляет 1 мин, а при комбинированном методе – 16 мин. Общее время термоотверждения при конвективном нагреве составляет 8 часов. Результаты экспериментальных исследований были использованы для совершенствования технологических процессов отверждения стеклопластиков теплозащитного и конструкционного назначения.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, стеклопластик, интенсификация процесса отверждения, ускоренные электроны, инфракрасный нагрев, источник электронов.

#### **Zadoya N., Rudyk N. Radiation processing in the technology of manufacturing products from fiberglass**

**Purpose.** The purpose of the work is to intensify the processes of solidification of thin-walled fiberglass's of structural and thermal protection purposes and to increase their physical and mechanical characteristics by means of radiation treatment methods.

**Research methods.** Fiber fixtures of structural and thermal protection purposes were investigated. As a filler, the silicon-based fiberglass CT-II-TOA, which was subjected to heat treatment and reprocessing, was used [5]. As a binder, EPT-10 epoxy resin and LBS-4 phenol-formaldehyde resin were used. Radiation treatment with accelerated electrons was carried out on an accelerator type ELT-1,5. For the implementation of infrared heating, halogen filament lamps were used KTT-220-1000, which were located "corridor" to provide a uniform temperature field [2]. The breaking loads were measured on a bursting machine MR-0,5-1 at a loading speed of 50 mm / min. An electron microscopic analysis was performed on an electron microscope REM 200.

**Scientific novelty.** The methods of radiation influence on the processes of formation of the internal structure of fiberglass have been proposed and investigated and it has been established that radiation treatment is an effective way for directed changes in the structure and properties of polymers and intensification of the processes of solidification of composites. The results of the research confirmed the fact of the intensification of the hardening of glass fibers through the use of radiation irradiation compared with convective heating. It has been established that radiation treatment with a combined method provides an increase in the index of strength for fiberglass's of thermal and protective design to 18 % and 20 % respectively.

**Practical value.** The technology of radiation treatment by the combined method of fiberglass thermoprotective and structural design, including infrared heating and pre-hardening by accelerated electrons, is developed. For complete completion of the process, the heating time during radiation treatment with accelerated electrons is 1 min, and with the combined method – 16 min. Total heat-termination time for convective heating is 8 hours. The results of experimental studies were used to improve the technological processes of hardening of fiberglass's of thermal and structural design.

**Key words:** composite materials, fiberglass, intensification of curing process, accelerated electrons, infrared heating, electron source.

---