

УДК 538.9:536.6:536.2:621.1

**СТВОРЕННЯ НИЗЬКОТЕПЛОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ
НАНОКОМПОЗИТІВ ДЛЯ ВНУТРІШНІХ ГАЗОВІДВІДНИХ СТВОЛІВ
ДИМОВИХ ТРУБ КОТЕЛЕНЬ**

***Н. М. Фіалко, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН
України***

***Р. В. Дінжос, доктор технічних наук, професор, старший науковий
співробітник***

***В. Г. Прокопов, доктор технічних наук, професор, головний науковий
співробітник***

***Ю. В. Шеренковський, кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник, провідний науковий співробітник***

***Н. О. Меранова, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник***

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: nmfialko@ukr.net

Анотація. *Наведено методики та результати експериментальних досліджень теплофізичних, структурних і механічних властивостей низькотеплопровідних полімерних наноккомпозитів, орієнтованих на виготовлення газовідвідних каналів та димових труб котельних установок, а також інших різних газових і водяних комунікацій. У роботі на основі виконаного комплексу методичних досліджень з аналізу правомірності використання для прогнозування теплопровідних властивостей вказаних композитів різних моделей теплопровідності розглянуто можливість застосування для цього прогнозування ряду моделей теорії ефективного середовища і теорії перколяції. Виконано аналіз теплофізичних властивостей, структурних характеристик і модуля Юнга низькотеплопровідних полімерних наноккомпозитів на основі поліетилену і поліпропілену. На прикладі цих наноккомпозитів продемонстровано досягнення істотного підвищення їхнього модуля Юнга порівняно з ненаповненими полімерами при відносно невеликому підвищенні коефіцієнтів теплопровідності. Для отримання наноккомпозитів застосовувався метод, що базується на змішуванні компонентів у розплаві полімеру з використанням екструдера при подальшому наданні композиту необхідної форми способом гарячого пресування. Для визначення модуля Юнга використовувався метод диференційно скануючої калориметрії. На основі проведених досліджень показано можливість отримання низькотеплопровідних*

полімерних нанокомпозитів з поліпшеними механічними характеристиками. Зокрема, показано, що для нанокомпозитів на основі поліетилену або поліпропілену, наповнених ВНТ (вуглецевими нанотрубками) або нанодисперсними частками аеросилу, при масовій частці останніх до 2 % має місце відносно незначне підвищення коефіцієнтів теплопровідності та суттєве зростання модуля пружності при розтягуванні. Дані досліджень дозволили також отримати для розроблених нанокомпозитів температурні залежності їх питомої масової теплоємності і на цій основі провести аналіз закономірностей зміни структурних характеристик цих матеріалів.

Ключові слова: *низькотеплопровідні полімерні нанокомпозити, моделі теплопровідності, теплофізичні властивості, газовідвідні комунікації котельних установок*

Актуальність. Одним із шляхів підвищення експлуатаційної та екологічної надійності димових труб паливоспоживальних теплових установок є застосування антикорозійних матеріалів для виготовлення корпусів цих труб або вставних газовідвідних стволів в існуючі оболонки труб. Вказані заходи набирають особливої актуальності в умовах застосування сучасних теплоутилізаційних технологій. Зокрема, в комунальній теплоенергетиці ці технології характеризуються глибоким охолодженням відхідних димових газів котлів, яке зазвичай призводить до конденсації в газовідвідних трактах і, як наслідок, їхнє корозійне руйнування [1-3]. Антикорозійними матеріалами можуть слугувати полімерні нанокомпозити, що мають унікальні властивості щодо корозійної стійкості, теплової ізоляції та вартості.

За умов застосування полімерних нанокомпозитів для конструювання газовідвідних стволів димових труб одночасно з вимогами щодо їхніх теплофізичних характеристик висувуються також вимоги стосовно механічних властивостей. Останнє пов'язане з необхідністю забезпечення конструкційної міцності цих елементів. Зважаючи на це, актуальним є завдання розробки низькотеплопровідних полімерних нанокомпозитів з поліпшеними механічними властивостями і дослідження їхніх теплофізичних, структурних і механічних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системні дослідження полімерних нанокомпозитів проводяться лише протягом останнього десятиліття. До основних

напрямів цієї тематики відносяться дослідження структуроутворення і властивостей нанокompозитів, механізмів процесів переносу в них, методів отримання тощо. При цьому ці дослідження стосуються, здебільшого, фундаментальних аспектів нанонауки [4-6].

Щодо прикладного аспекту досліджень полімерних нанокompозитів, то вони не цілком задовольняють зростаючі потреби практики їх використання. Так, за даними літературних джерел дослідження, пов'язані з використанням полімерних нанокompозитів в теплоенергетиці, є вельми обмеженими і не охоплюють великого кола питань, вирішення яких необхідне для їх широкого застосування. Зокрема, практично відсутні роботи, присвячені вибору полімерних композиційних матеріалів для основного та допоміжного теплоенергетичного устаткування, аналізу ефективності цього устаткування.

Метою дослідження є визначення теплофізичних властивостей, структурних характеристик і модуля Юнга низькотеплопровідних полімерних нанокompозитів на основі поліетилену і поліпропілену, які орієнтовані на виготовлення газовідвідних стволів димових труб, а також можуть бути застосовані для інших газових та водяних комунікацій.

Матеріали і методи дослідження. У ході досліджень використовувався поліетилен високого тиску і низької щільності. Як наповнювачі застосовувались ВНТ (вуглецеві нанотрубки) і наночастинки пірогенного аеросилу SiO_2 . Опис основних характеристик використовуваних ВНТ наведено в [7]. Наночастинки аеросилу кремнію (Aerosil 1380, Degussa Co, Німеччина) мали діаметр 40 нм. Масова доля наповнювачів в полімерних нанокompозитах змінювалася від 0,1 до 3 %.

Для отримання нанокompозитів застосовувався метод, що базується на змішуванні компонентів у розплаві полімеру з використанням екструдера при подальшому наданні композиту необхідної форми шляхом гарячого пресування [8]. Експериментальні методики визначення теплофізичних властивостей розроблених композитів наведено в [7]. Для визначення модуля Юнга використовувався метод диференційно скануючої калориметрії.

Відповідно до призначення низькотеплопровідних полімерних композитів для завдань даної роботи висувався цілий ряд вимог, основні з яких стосуються, по-перше, величини коефіцієнта теплопровідності і діапазону робочих температур матеріалу, і, по-друге, значення модуля пружності при розтягуванні (модуля Юнга). При цьому залежно від призначення і умов експлуатації матеріалу ці вимоги є суттєво різними. Стосовно значень коефіцієнта теплопровідності, то тут вимоги визначаються, головним чином, необхідністю забезпечення при експлуатації димових труб мінімального рівня тепловтрат.

На першому етапі роботи було виконано комплекс методичних досліджень з аналізу правомірності використання для прогнозування теплопровідних властивостей необхідних композитів різних моделей теплопровідності. Розглянуто можливості застосування ряду моделей теорії ефективного середовища і теорії перколяції. Розгляду підлягали дві моделі теорії ефективного середовища і дві моделі теорії перколяції [4-6]. Показано, що:

а) моделі теорії ефективного середовища - модель Максвела і модифікована модель Бруггемана - адекватно описують концентраційну поведінку коефіцієнта теплопровідності тільки в певних діапазонах вмісту наповнювача;

б) моделі теорії перколяції - модель Киркпатрика і модель Маклахлана - забезпечують адекватне прогнозування теплопровідних властивостей композитів в усьому діапазоні зміни вмісту наповнювача; при цьому модель Маклахлана є дещо прийнятнішою.

Результати досліджень та їх обговорення. У роботі на прикладі нанокомпозитів на основі поліетилену та поліпропілену, призначених для створення різних трубопроводів, показана можливість суттєвого підвищення їх модуля Юнга порівняно з ненаповненими полімерами при відносно невеликому підвищенні коефіцієнтів теплопровідності. На рис. 1 за результатами проведених експериментальних досліджень наведено відповідні концентраційні залежності.

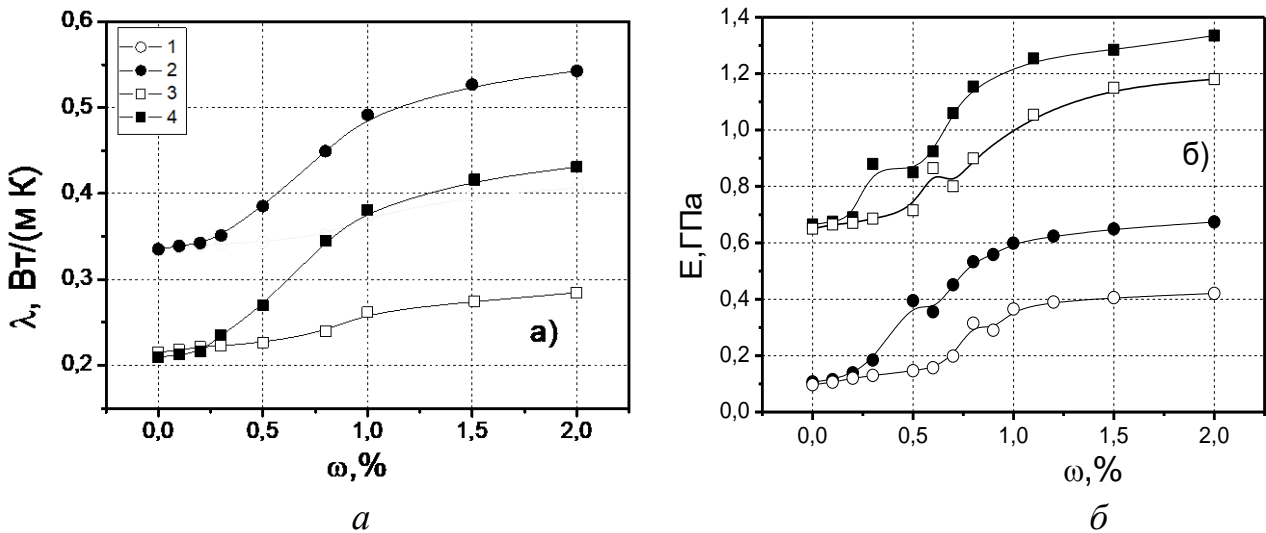


Рис. 1. Концентраційні залежності коефіцієнта теплопровідності (а) і модуля Юнга (б) композитів на основі поліетилену (1, 2) і поліпропілену (3, 4), наповнених ВНТ (2, 4) і наночастинками аеросила (1, 3)

Як видно з рисунку, характер зміни величин λ і E загалом аналогічний. Тобто має місце тенденція до збільшення значень λ і E при зростанні масової частки наповнювача ω . Що ж до ефектів стрибкоподібної зміни цих величин, то вони пов'язані з утворенням з частинок наповнювача перколяційних структур. У цьому разі вказані стрибкоподібні зміни модуля Юнга спостерігаються при дещо менших значеннях масової частки наповнювача, ніж відповідні зміни коефіцієнта теплопровідності. (наприклад, для поліетилену, наповненого ВНТ, різкій зміні величини λ відповідає значення $\omega = 0,78$ %, а модуля Юнга - $\omega = 0,60$ %). Це свідчить про вищу чутливість механічних характеристик до формування перколяційних кластерів і сіток.

Стосовно значень масової концентрації, які відповідають стрибкоподібній зміні величин λ і E , належить також відмітити, що вони є меншими при наповненні полімерів ВНТ, ніж при їх наповненні аеросилом. До того ж, ці значення при використанні обох розглянутих наповнювачів зсуваються в область великих величин ω для композитів на основі поліпропілену порівняно з композитами на основі поліетилену.

Що стосується концентраційної залежності модуля Юнга, то тут в першу чергу необхідно вказати на ту обставину, що при відносно невеликому вмісті наповнювачів (до 2 %) можливе суттєве підвищення величини E . Так, для поліетилену, наповненого ВНТ, значення E зростає більш ніж в 6 разів при збільшенні ω від 0 до 2 %.

За даними рис. 1, б, для композитів на основі поліпропілену можна зробити висновок, що величини E вищі, ніж для композитів на основі поліетилену в усьому наведеному діапазоні зміни ω . Це, як очевидно, пов'язано з більш високим значенням модуля Юнга для ненаповненого поліпропілену в порівнянні з поліетиленом. А саме, для поліпропілену це значення становить 0,665 ГПа, а для поліетилену – лише 0,106 ГПа. Згідно з отриманими даними, модуль Юнга для композитів, наповнених ВНТ, перевищує відповідні значення для композитів, наповнених аеросилом. Причому ці відмінності загалом є дещо більшими для композитів на основі поліетилену. Наприклад, при $\omega = 2$ % розбіжність значень E , що відповідають ВНТ і аеросилу, для поліпропілену становлять 0,150 ГПа, а для поліетилену - 0,253 ГПа.

Як свідчать отримані дані, в розглянутих умовах наповнення полімерів не призводить до значного зростання коефіцієнтів теплопровідності (див. рис. 1, а). При цьому більше підвищення λ спостерігається за інших рівних умов для композитів на основі поліетилену. Це обумовлено більш високими значеннями λ для ненаповненого поліетилену в порівнянні з поліпропіленом. Що ж до нанодисперсних наповнювачів, то застосування вуглецевих нанотрубок призводить до суттєвішого зростання λ , ніж застосування аеросилу.

У таблицях 1, 2 наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення температурної залежності питомої масової теплоємності для отримуваних полімерних композитів.

1. Температурна залежність питомої масової теплоємності c_p (кДж/(кг·К)) полімерного композиту на основі поліетилену, наповненого ВНТ і нанодисперсними частинками аеросила

Наповнювач	Вміст наповнювача, %	Т, К									
		320	380	385	390	395	400	405	410	415	420
ВНТ	0,3	1,78	2,76	3,16	3,62	4,98	6,96	12,9	15,3	5,01	2,51
	2	1,72	2,67	3,04	3,48	4,79	6,71	12,4	14,8	4,83	2,42
	3	1,73	2,65	3,03	3,46	4,76	6,64	12,2	14,6	4,79	2,41
Аеросил	0,3	1,77	2,76	3,17	3,63	5,01	7,01	12,9	15,5	5,04	2,52
	2	1,78	2,74	3,14	3,57	4,90	6,82	12,6	14,9	4,94	2,50
	3	1,79	2,73	3,11	3,64	4,85	6,74	12,3	14,7	4,88	2,49

2. Температурна залежність питомої масової теплоємності c_p (кДж/(кг·К)) полімерного композиту на основі поліпропілену, наповненого УНТ і нанодисперсними частинками аеросила

Наповнювач	Вміст наповнювача, %	Т, К									
		300	360	420	425	430	435	440	442	445	450
ВНТ	0,3	1,75	2,27	3,56	4,10	4,88	5,81	6,71	6,79	6,16	3,11
	2	1,82	2,26	3,36	3,82	4,49	5,29	6,05	6,11	5,58	2,97
	3	1,88	2,28	3,29	3,72	4,33	5,05	5,75	5,81	5,32	2,93
Аеросил	0,3	1,75	2,28	3,62	4,17	4,98	5,94	6,87	6,95	6,31	3,15
	2	1,82	2,31	3,55	4,07	4,82	5,69	6,57	6,64	6,05	3,11
	3	1,91	2,38	3,56	4,06	4,77	5,61	6,45	6,52	5,95	3,14

За наведеними даними, температура фазового переходу для цих композиційних матеріалів практично не залежить від масової частки наповнювача. Тобто діапазон їхніх робочих температур відповідає певному діапазону для полімерних матриць. Отримані експериментальні залежності питомої масової теплоємності композитів від температури слугували також основою для визначення однієї з найважливіших структурних характеристик полімерних композитів - міри їхньої кристалічності X [8].

Залежність міри кристалічності досліджуваних композитів від масової частки наповнювача наведено на рис. 2.

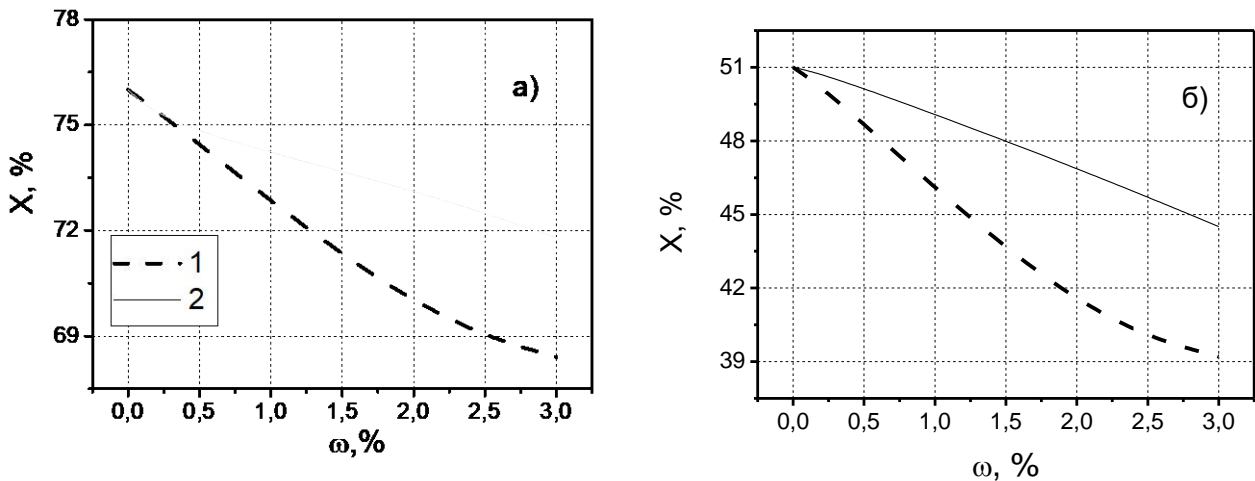


Рис. 2. Залежність міри кристалічності поліетилену (а) і поліпропілену (б) від масової частки наповнювача для композитів, що містять ВНТ (1) і аеросил (2).

Як випливає з рис. 2, зниження міри кристалічності при збільшенні масової частки наповнювача є дещо значнішим для композитів на основі поліпропілену. Наприклад, це зниження в розглянутому діапазоні зміни ω у разі наповнення полімерів ВНТ становить для матриці з поліетилену 7,6 %, а для матриці з поліпропілену - 11,8 %. У цих обставинах для обох матриць менше падіння міри кристалічності X спостерігається при їх наповненні аеросилом. Останнє, як очевидно, пов'язано з меншою ефективністю утворення перколяційних структур наночастинок аеросила порівняно з ВНТ.

Висновки і перспективи.

1. У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлена можливість отримання низькотеплопровідних полімерних нанокомпозитів з поліпшеними механічними характеристиками для газовідвідних стволів димових труб. Зокрема показано, що для нанокомпозитів на основі поліетилену або поліпропілену, наповнених ВНТ або нанодисперсними частками аеросилу, при масовій частці останніх до 2 % має місце: а) відносно незначне підвищення коефіцієнтів теплопровідності (до $\lambda = 0,54$ Вт/ (м К)); б) суттєве зростання модуля пружності при розтягуванні (до $E=1,33$ ГПа).

2. На основі проведених досліджень для розроблюваних полімерних нанокомпозитів отримано температурні залежності їх питомої масової теплоємності

і на цій основі проведено аналіз закономірностей зміни структурних характеристик цих матеріалів.

3. Отримані полімерні матеріали з підвищеними механічними показниками характеризуються стійкістю до корозії та мають теплоізоляційні властивості.

Результати досліджень будуть використані: при розробленні технології виготовлення пропонованих полімерних композитів; при реконструкції та проектуванні котелень для конструювання газовідвідних стволів димових труб і інших газових каналів, а також водяних комунікацій різного призначення; при розробленні систем антикорозійного захисту димових труб за умов застосування сучасних теплоутилізаційних технологій котельних установок.

Список використаних джерел

1. Долинский А. А., Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой теплоэнергетики. Промышленная теплотехника. 2014. № 4. С.27–36.
2. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Степанова А. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография. Киев: ООО «Про формат», 2018. 248 с.
3. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А., Шевчук С. И., Дашковская И. Л. Осушение дымовых газов котельных установок в конденсационных теплоутилизаторах. Международный научный журнал "Интернаука". 2019. Т 1, №15. С. 109–111.
4. Lin Chen, Ying-Ying Sun, Jun Lin, Xiao-Ze Du, Gao-Sheng Wei, Shao-Jian He, Sergei Nazarenko. Modeling and analysis of synergistic effect in thermal conductivity enhancement of polymer composites with hybrid filler. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 81. P. 457–464.
5. Kirkpatrick S. Percolation and Conduction. Reviews of modern physics. 1973. Vol. 45, №4. P. 574–585.
6. D.S. McLachlan, C. Chiteme, W.D. Heiss, Junjie Wu. The correct modelling of the second order terms of the complex Acconductivity results for continuum percolation media, using a single phenomenological equation. Physica B: Condensed Matter. 2003. Vol. 338. P. 256–260.
7. Долинский А. А., Фиалко Н. М., Динжос Р. В., Навродская Р. А. Теплофизические свойства полимерных микро- и нанокомпозитов на основе поликарбоната. Промышленная теплотехника. 2015. №2. С. 12–19.
8. Долинский А. А., Фиалко Н. М., Динжос Р. В., Навродская Р. А. Влияние методов получения полимерных микро- и нанокомпозитов на их теплофизические свойства. Промышленная теплотехника. 2015. № 4. С. 5–13.

References

1. Dolinsky, A. A., Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Gnedash, G. A. (2014). Osnovnyye printsipy sozdaniya teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlya kotel'nykh maloy teployenergetiki [Basic principles of creation of heat recovery technologies for boiler houses of small heat and power engineering]. *Industrial Heat Engineering*, 36(4), 27–34.
2. Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I., Presich, G. A., Gnedash, G. A. (2018). Teplovyie metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotel'nykh ustanovok [Heat methods of protection of gas exhaust ducts of boiler plants]. Kyiv: LLC "Pro Format", 248.
3. Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Gnedash, G. A., Shevchuk, S. I., Dashkovskaya I. L. (2019). Osusheniye dymovykh gazov kotel'nykh ustanovok v kondensatsionnykh teploutilizatorakh [Dehumidification of flue gases of boiler plants in condensing heat recovery units]. *International scientific journal "Internauka"*, 1(15), 109–111.
4. Lin Chen, Ying-Ying Sun, Jun Lin, Xiao-Ze Du, Gao-Sheng Wei, Shao-Jian He, Sergei Nazarenko. (2015). Modeling and analysis of synergistic effect in thermal conductivity enhancement of polymer composites with hybrid filler. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 457–464.
5. Kirkpatrick, S. (1973). Percolation and Conduction. *Reviews of modern physics*, 45(4), 574.
6. D.S. McLachlan, C. Chitame, W.D. Heiss, Junjie Wu. (2003). The correct modelling of the second order terms of the complex AC conductivity results for continuum percolation media, using a single phenomenological equation. *Physica B: Condensed Matter*, 338(1-4), 256–260.
7. Dolinsky, A. A., Fialko, N. M., Dinzhos, R. V., Navrodska, R. A. (2015). Teplofizicheskiye svoystva polimernykh mikro- i nanokompozitov na osnove polikarbonata [Thermophysical properties of polymer micro- and nanocomposites based on polycarbonate]. *Industrial Heat Engineering*, 2, 12–19.
8. Dolinsky, A. A., Fialko, N. M., Dinzhos, R. V., Navrodska, R. A. (2015). Vliyaniye metodov polucheniya polimernykh mikro- i nanokompozitov na ikh teplofizicheskiye svoystva [Influence of methods of obtaining polymer micro- and nanocomposites on their thermophysical properties]. *Industrial Heat Engineering*, 4, 5–13.

СОЗДАНИЕ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ ВНУТРЕННИХ ГАЗООТВОДЯЩИХ СТЕБЛОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ КОТЕЛЬНЫХ

***Н. М. Фялко, Р. В. Динжос, В. Г. Прокопов, Ю. В. Шеренковский, Н. О.
Меранова***

Аннотация. Приведены методики и результаты экспериментальных исследований теплофизических, структурных и механических свойств низкотеплопроводных полимерных наноконпозитов, ориентированных на использование для газоотводящих каналов и дымовых труб котельных установок, а также других различных газовых и водяных коммуникаций. В работе на основе выполненного комплекса методических исследований относительно анализа правомерности использования для прогнозирования теплопроводящих свойств

указанных композитов разных моделей теплопроводности рассмотрена возможность применения для этого прогнозирования ряда моделей теории эффективной среды и теории перколяции. Выполнен анализ теплофизических свойств, структурных характеристик и модуля Юнга низкотеплопроводных полимерных нанокомпозитов на основе полиэтилена и полипропилена. На примере данных нанокомпозитов продемонстрировано достижение существенного повышения их модуля Юнга по сравнению с ненаполненными полимерами при относительно небольшом повышении коэффициентов теплопроводности. Для получения нанокомпозитов применялся метод, базирующийся на смешении компонентов в расплаве полимера с использованием экструдера при последующем придании композиту необходимой формы способом горячего прессования. Для определения модуля Юнга использовался метод дифференциально сканирующей калориметрии. На основе проведенных исследований показана возможность получения низкотеплопроводных полимерных нанокомпозитов с улучшенными механическими характеристиками. В частности показано, что для нанокомпозитов на основе полиэтилена или полипропилена, наполненных УНТ (углеродными нанотрубками) или нанодисперсными частицами аэросила, при массовой доле последних до 2 % имеет место относительно незначительное повышение коэффициентов теплопроводности и существенное увеличение модуля упругости при растяжении. Данные исследований позволили также получить для разработанных нанокомпозитов температурные зависимости их удельной массовой теплоемкости и на этой основе провести анализ закономерностей изменения структурных характеристик этих материалов.

Ключевые слова: *низкотеплопроводные полимерные нанокомпозиты, модели теплопроводности, теплофизические свойства, газоотводящие коммуникации котельных установок*

CREATION OF LOW-THERMAL-CONDUCTIVITY POLYMER NANOCOMPOSITES FOR INTERNAL GAS VENTS OF BOILER CHIMNEYS

N. Fialko, R. Dinzhos, V. Prokopov, Ju. Sherenkovsky, N. Meranova

Abstract. *Methods and results of experimental studies of thermophysical, structural and mechanical properties of low-heat-conducting polymer nanocomposites, oriented to use for gas ducts and chimneys of boiler installations, as well as various other gas and water communications are presented. In this work, on the basis of the performed set of methodological studies regarding the analysis of the legitimacy of using different models of heat conductivity for predicting the heat-conducting properties of these composites, the possibility of using for this prediction a number of models of the theory of the effective medium and the theory of percolation is considered. The analysis of thermophysical properties, structural characteristics and Young's modulus of low-heat-conductivity polymer nanocomposites based on polyethylene and polypropylene is carried out. Using these nanocomposites as an example, the achievement of a significant increase in their Young's modulus in comparison with unfilled polymers with a relatively small increase in heat conductivity is demonstrated. To obtain nanocomposites, we used a method based on*

mixing the components in a polymer melt using an extruder and then shaping the composite into the required shape by hot pressing. The method of differential scanning calorimetry was used to determine Young's modulus. On the basis of the studies carried out, the possibility of obtaining low-heat-conducting polymer nanocomposites with improved mechanical characteristics has been shown. In particular, it was shown that for nanocomposites based on polyethylene or polypropylene filled with CNTs (carbon nanotubes) or nanodispersed aerosil particles, with a mass fraction of the latter up to 2%, the following takes place a relatively insignificant increase in heat conductivity coefficients and a significant increase in the modulus of elasticity in tension. The research data also made it possible to obtain for the developed nanocomposites the temperature dependences of their specific mass heat capacity and, on this basis, to analyze the regularities of changes in the structural characteristics of these materials.

Key words: *low-heat-conductivity polymer nanocomposites, heat conductivity models, thermophysical properties, gas outlet communications of boiler installations*