

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 667.64:678.026

А.В. АКИМОВ, А.А. САПРОНОВ, А.В. ШАРКО,
В.Д. МИХАЙЛИК, Т.І. ІВЧЕНКО
Херсонська державна морська академія,
О.І. СКІРДЕНКО
Херсонський державний університет

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ТРАНСПОРТЕ С ЦЕЛЮ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Методами ІК-спектрального аналізу проведено дослідження структури і природи хімічних зв'язків, які виникають при структуроутворенні епоксидних композитів, пластифікованих трихлоретилфосфатом і наповнених трикомпонентними бідисперсними наповнювачами різної фізико-хімічної природи. Як наповнювачі використовували дрібнодисперсні наповнювачі – совелітовий порошок і вуглекислий кальцій, а також грубозернисті наповнювачі – алюмінат кальцію і хлорамін Б. Кількісний аналіз ІК-спектрів проводили за законом Ламберта-Бера, враховуючи при цьому значення інтенсивності пропускання (%), півширини (b), площі (%) смуг поглинання епоксидного матеріалу. На основі проведення ІК-спектрального порівняльного аналізу смуг поглинання епоксидної матриці та розроблених композитів обрані матеріали з підвищеним ступенем зшивання, а, отже, і полішеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями характеризуються матеріали.

Ключові слова: епоксидний композит, трикомпонентний бідисперсний наповнювач, ІК-спектральний аналіз.

О.В. АКИМОВ, О.О. САПРОНОВ, О.В. ШАРКО, В.Д. МИХАЙЛИК, Т.І. ІВЧЕНКО
Херсонська державна морська академія
О.І. СКІРДЕНКО
Херсонський державний університет

**АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК НА ТРАНСПОРТІ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЇХ НАДІЙНОСТІ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Методами ІЧ-спектрального аналізу проведено дослідження структури і природи хімічних зв'язків, які виникають при структуроутворенні епоксидних композитів, пластифікованих трихлоретилфосфатом і наповнених трикомпонентними бідисперсними наповнювачами різної фізико-хімічної природи. Як наповнювачі використовували дрібнодисперсні наповнювачі – совелітовий порошок і вуглекислий кальцій, а також грубозернисті наповнювачі – алюмінат кальцію і хлорамін Б. Кількісний аналіз ІЧ-спектрів проводили за законом Ламберта-Бера, враховуючи при цьому значення інтенсивності пропускання (%), півширини (b), площі (%) смуг поглинання епоксидного матеріалу. На основі проведення ІЧ-спектрального порівняльного аналізу смуг поглинання епоксидної матриці та розроблених композитів обрані матеріали з підвищеним ступенем зшивання, а, отже, і полішеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями характеризуються матеріали.

Ключові слова: епоксидний композит, трикомпонентний бідисперсний наповнювач, ІЧ-спектральний аналіз.

A.V. AKIMOV, O.O. SAPRONOV, A.V. SHARKO, V.D. MIKHAYLIK, T.I. IVCHENKO,
Kherson State Maritime Academy
O.I. SKIRDENKO
Kherson State University

**ANALYSIS OF PROTECTIVE COATINGS FOR CELL POWER PLANTS IN TRANSPORT IN
ORDER TO ENSURE THEIR RELIABILITY IN EXPLOITATION**

By infrared spectral analysis of a study structure and the nature of the chemical bonds that arise in the structure formation of epoxy composites, plasticized trichloroethylphosphate and filled three-component

bidisperse fillers of various physical and chemical nature. As fillers used fine fillers – sovelite powder and calcium carbonate, and the coarse fillers – calcium aluminate and chloramine B. Quantitative analysis of the infrared spectra was carried out according to the law of Lambert-Beer law, taking into account the value of intensity transmittance (%), the half-width (b), the area (%) of the absorption bands epoxy composites material. On the basis of the infrared spectral comparative analysis of the absorption bands of epoxy matrix composites developed and selected materials with a higher degree of cross-linking, and, consequently, improved mechanical and thermal properties characterized materials.

Keywords: epoxy composite, three-component filler bidisperse filler, infrared spectral analysis.

Постановка проблемы

Обеспечение безопасности эксплуатации и надежности элементов энергетических установок на транспорте предъявляет крайне жесткие требования к надежности материалов, используемых в конструкциях изделий, в которых с целью удовлетворения современных требований повышения энерговооруженности, снижения массы изделий все шире применяются современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1, 2]. Общеизвестно [1-10], что эпоксидные композитные материалы чувствительны к воздействию температуры.

Однако всестороннее применение этого класса материалов связано с решением целого круга сложных научно-технических проблем, в частности, с обеспечением гарантированного уровня основных эксплуатационных характеристик материалов в различных климатических районах.

На полимерные композиционные материалы существенное влияние оказывают атмосферные факторы (температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры и др.), которые, являясь активаторами старения ПКМ, способствуют развитию физико-химических процессов в материалах и за время эксплуатации изделий (25...30 лет) могут существенно снизить их прочностные свойства. Старение ПКМ является комплексным процессом: необходимо изучать не только отдельное влияние агрессивных факторов, но также учитывать и определять их совместное ускоряющее синергетическое воздействие: влагонасыщение, воздействие повышенных температур, циклы нагрева и охлаждения и механические нагрузки [11].

Проведение анализа структуры позволяет с достаточной степенью точности и достоверности охарактеризовать устойчивость и адаптивность внутренней структуры полимерных материалов и защитных покрытий на их основе, являющихся сложными гетерогенными системами, в процессе воздействия внешних эксплуатационных факторов [12]. Наряду с этим, особое внимание уделяют исследованию температуры полимеров, при которой происходят физико-химические превращения, что непосредственно влияет на свойства изделий или защитных покрытий в процессе эксплуатации [13]. Следует заметить, что введение наполнителей различной дисперсности и физико-химической природы улучшает свойства эпоксикомпозитных материалов, в том числе и теплофизические [14].

Для элементов транспортных энергетических установок применяются защитные покрытия, наполненные различными по природе и дисперсности частицами, что способствует улучшению комплекса их эксплуатационных характеристик. Кроме того, в связующее целесообразно вводить многокомпонентные бидисперсные наполнители для повышения эксплуатационных характеристик композитных материалов (КМ). Это позволит равномерно распределить влияние внешних нагрузок, действующих на покрытие, в макро- и микрообъемах матрицы [15].

Анализ последних исследований и публикаций

Значительный научный и практический опыт по разработке и исследованию свойств полимерных эпоксидных композитных материалов представлен в работах П.Д. Стухляка, А.В. Букетова, Ю.А. Михайлина и др., что позволяет провести анализ технологических процессов формирования, свойств и структуры материалов, наполненных частицами различной физико-химической природы и дисперсности. Также отдельное внимание следует уделить исследованиям поведения композитов и покрытий на их основе при повышенных температурах для объектов транспорта, энергетики и машиностроения. Для получения информации в данном направлении целесообразно использовать современные спектральные методы исследования (ИК-спектральный, термогравиметрический, дифференциально-термический анализ) процесса структурообразования на границе раздела фаз «связующее – дисперсный наполнитель» [1, 3, 6, 13, 14].

Формулировка цели исследования

Целью работы было исследование структуры эпоксикомпозитных защитных покрытий для элементов энергетических установок на транспорте с целью обеспечения их надежности в процессе эксплуатации.

Изложение основного материала исследования

Исследованы составы на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-93) с молекулярной массой 360...470, содержащей 21,5 % эпоксидных групп.

В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применяли отвердитель аминного типа –

полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594-85), способный формировать трехмерную сетчатую структуру в отсутствие нагрева. Химическая формула ПЭПА – $H_2N(CH_2CH_2NH)_nH$, где $n = 1...4$, динамическая вязкость ПЭПА – $0,9 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

В качестве пластификатора применяли трихлорэтилфосфат (ТХЭФ) (ТУ 6-05-1611-78). Молекулярная масса ТХЭФ – 285,49; внешний вид – низковязкая прозрачная маслянистая жидкость; химическая формула – $C_6H_{12}Cl_3O_4P$. При введении в композицию ТХЭФ получают материал, горение которого быстро прекращается после нивелирования действия открытого пламени.

Эпоксидное связующее формировали по следующей технологии: дозирование компонентов, гидродинамическое совмещение пластификатора и эпоксидной диановой смолы ЭД-20 до получения однородной смеси и последующего полного растворения добавки в течение времени $\tau = 2 \pm 0,1$ мин при комнатной температуре $T = 298 \pm 2 \text{ К}$, ультразвуковая обработка продолжительностью $\tau = 2 \pm 0,1$ мин, введение отвердителя ПЭПА и гидродинамическое совмещение компонентов в течение времени $\tau = 2 \pm 0,1$ мин, отверждение композиции. Отверждение КМ проводили по экспериментально установленному режиму: формирование образцов и их выдержка в течение $\tau = 12,0 \pm 0,1$ ч при температуре $T = 298 \pm 2 \text{ К}$, нагрев со скоростью $v = 3 \text{ К/мин}$ до выбранных температур сшивания $T = 393 \pm 2 \text{ К}$ и $T = 413 \pm 2 \text{ К}$ [10] (принято по результатам предварительного исследования адгезионных и физико-механических свойств исследуемых композитов), выдержка образцов при данной температуре в течение времени $t = 2,0 \pm 0,05$ ч, медленное охлаждение до температуры $T = 298 \pm 2 \text{ К}$. С целью стабилизации структурных процессов в матрице образцы выдерживали в течение времени $t = 24$ ч на воздухе при температуре $T = 298 \pm 2 \text{ К}$ с последующим проведением экспериментальных исследований.

Введение различных по природе, форме и дисперсности наполнителей в эпоксидное связующее способствует физико-химическому взаимодействию, возникающему на границе раздела фаз «полимер-наполнитель», и зависит от химической активности наполнителя, удельной площади поверхности, что существенно влияет на процессы структурообразования и определяет свойства КМ в процессе эксплуатации. С учетом того, что необходимо обеспечить негорючесть материалов в качестве наполнителей для экспериментальных исследований использованы: мелкозернистые наполнители ($d = 5...10 \text{ мкм}$) – совелитовый порошок (ТУ36-131-83) и углекислый кальций (ГОСТ 4530-76), а также крупнозернистые наполнители ($d = 63 \text{ мкм}$) – алюминат кальция (ГОСТ 969-91) и хлорамин Б (ТУ 9392-031-00203306-97).

Совелитовый порошок (СП) состоит из смеси солей карбоната магния ($MgCO_3$) и карбоната кальция ($CaCO_3$) с асбестом ($MgSiO_3$). Средняя плотность порошка не превышает 350 кг/м^3 .

Углекислый кальций (УК) в качестве основного ингредиента содержит карбонат кальция – 99,7%. Благодаря высокой термостойкости УК достаточно часто используют в виде антипирена. Введение в материалы УК обеспечивает повышение показателей их ударной вязкости, прочности на изгиб, жесткости и уменьшение хрупкости.

Алюминат кальция (АК) или глиноземистый цемент – неорганическое соединение с химической формулой $Ca(AlO_2)_2$. Физические свойства: молярная масса – $158,039 \text{ г/моль}$; температура плавления – $1605 \text{ }^\circ\text{C}$; плотность – $2,98 \text{ г/см}^3$.

Хлорамин Б (ХАБ) представляет собой кристаллогидрат натриевой соли хлорамида бензолсульфокислоты. При нагревании разлагается с выделением хлора и хлористого водорода. Химическая формула $C_6H_5SO_2NClNa$. Молярная масса – $213,5 \text{ г/моль}$. ХАБ – белый или слегка желтоватый кристаллический порошок со слабым запахом хлора.

На основе исследования физико-механических и теплофизических свойств композитов установлено, что улучшенными свойствами отличаются композиты с содержанием трехкомпонентного бидисперсного наполнителя [15], количество компонентов которого установили исходя из полученных результатов статистической обработки данных экспериментов. В частности, улучшенными свойствами отличаются композитные материалы (КМ), состоящие из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 ($q = 100 \text{ масс.ч.}$), пластифицированной трихлорэтилфосфатом ($q = 10 \text{ масс.ч.}$) и наполненной частицами алюмината кальция (АК), хлорамина Б (ХАБ), совелитового порошка (СП) или углекислого кальция (УК) при различном содержании трехкомпонентной добавки ($q_1 + q_2 + q_3$), масс.ч.:

КМ1 – АК (70 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + СП (20 масс.ч.);

КМ2 – АК (60 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + СП (10 масс.ч.);

КМ3 – АК (80 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + СП (10 масс.ч.);

КМ4 – АК (40 масс.ч.) + ХАБ (2 масс.ч.) + УК (30 масс.ч.);

КМ5 – АК (30 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + УК (20 масс.ч.);

КМ6 – АК (40 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + УК (15 масс.ч.)

Для исследования физико-химических процессов при сшивании эпоксидных композитов проводили ИК-спектральный анализ. Предварительно проводили исследование ИК-спектра эпоксидной матрицы (рис. 1). При исследовании ИК-спектра эпоксидной матрицы обнаружено полосу поглощения с волновым числом $\nu = 574,79 \text{ см}^{-1}$, которая характеризуется интенсивностью пропускания $T = 1,3 \%$ и

полушириной $b = 64,7 \text{ см}^{-1}$. Данная полоса характеризует присутствие простых эфиров и ароматических углеродов (рис. 1) в пластифицированной матрице, а относительная величина площади пиков – $S = 127,6 \%$ указывает на значительное их количество. Полоса поглощения с волновым числом $\nu = 671,23 \text{ см}^{-1}$ и интенсивностью пропускания $T = 1,1 \%$, а также с полушириной $b = 48,5 \text{ см}^{-1}$, свидетельствует о маятниковых колебаниях $-\text{CH}-$ групп и о наличии первичных аминогрупп эпоксидного связующего. При этом присутствие связи $\text{C}-\text{Cl}$ с характерной относительно большой величиной площади пика ($S = 109,3 \%$) свидетельствует о наличии значительного количества пластификатора ТХЭФ.

Полосы поглощения в диапазоне волновых чисел $\nu = 736,81 \dots 767,67 \text{ см}^{-1}$ относятся к маятниковым колебаниям $-\text{CH}-$, $-\text{NH}-$ групп и первичным аминогруппам эпоксидного связующего (рис. 1). Полоса поглощения при волновом числе $\nu = 837,11 \text{ см}^{-1}$ характерна для эпоксидных групп, маятниковых колебаний $-\text{NH}-$, $-\text{CH}-$ групп, валентных колебаний $-\text{C}-\text{C}-$ групп. Дополнительно обнаружены первичные амины и ароматические углероды. Также обнаружены валентные колебания эпоксидных, $-\text{C}-\text{C}-$, $-\text{C}-\text{N}-$ и $-\text{C}-\text{O}-$ групп на спектре матрицы при волновом числе $\nu = 975,98 \text{ см}^{-1}$. Полоса поглощения при таком волновом числе свидетельствует о колебаниях бензольного кольца и валентных колебаниях $-\text{C}-\text{O}-$ групп. В диапазоне волновых чисел $\nu = 1183,15 \dots 1458,18 \text{ см}^{-1}$ обнаружены валентные колебания $-\text{C}-\text{N}-$, $-\text{C}-\text{C}-$, $-\text{C}-\text{O}-$ групп, деформационные колебания $-\text{OH}-$ групп, наличие простых эфиров, эпоксидных и аминогрупп (рис. 1). Более детально характеристику ИК-спектра представлено на рис. 1 и в работе [13].

На следующем этапе проводили сравнение ИК-спектров матрицы и композитов, которые содержат трехкомпонентный дисперсный наполнитель (рис. 2, а-е). При этом сначала анализировали спектры композитов КМ1-КМ3.

При сравнении ИК-спектров эпоксидной матрицы и композитов (рис. 2, а-в) установлено образование полосы поглощения при волновом числе $\nu = 516,92 \text{ см}^{-1}$, которая характеризует простые эфиры $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$ и пара бензол, что косвенно свидетельствует об увеличении плотности пространственной сетки полимера при введении дисперсного наполнителя. Не менее важным является отсутствие полос поглощения при волновых числах $\nu = 574,79 \text{ см}^{-1}$, $\nu = 736,81 \text{ см}^{-1}$, $\nu = 767,67 \text{ см}^{-1}$ для КМ1, КМ2, КМ3, что указывает на повышенную степень сшивания и улучшенные физико-механические свойства КМ относительно матрицы. Значительное внимание следует уделить результатам исследования относительно уменьшения параметров T , b , S при $\nu = 840,96 \text{ см}^{-1}$ и смещения полосы поглощения в сторону больших волновых чисел на $\Delta\nu = 3,85 \text{ см}^{-1}$ (рис. 2). При этом наименьшей относительной величиной площади пиков ($S = 53,3 \%$) характеризуется спектр для композита КМ1. То есть, можно утверждать, что в данном случае происходит разрушение эпоксидных групп и конверсия активных радикалов с образованием $-\text{NH}-$ связей. Кроме этого, после сшивания эпоксидного композита обнаружена полоса поглощения при $\nu = 879,54 \text{ см}^{-1}$, наименьшие параметры (T , b , S) которой установлены для КМ1 (рис. 2), что свидетельствует о повышенной степени сшивания полимера вследствие высокой степени конверсии эпоксидных групп. Следует заметить, что характерных изменений (разрушение связей или образование новых связей) в диапазоне волновых чисел $\nu = 1056,99 \dots 1890,24 \text{ см}^{-1}$ для КМ1-КМ3 не обнаружено, однако замечено уменьшение параметров T , b , S (рис. 2) и смещение полос поглощения относительно аналогичных полос на спектре эпоксидной матрицы. Наименьшими параметрами T , b , S в диапазоне волновых чисел $\nu = 1056,99 \dots 1890,24 \text{ см}^{-1}$ характеризуется КМ1, что свидетельствует об улучшенных свойствах этого материала, относительно исследованных КМ.

Уменьшение параметров T , b , S в области волновых чисел $\nu = 2063,83 \dots 2360,87 \text{ см}^{-1}$ свидетельствует о формировании тройных связей $\text{C}\equiv\text{C}$, $\text{C}\equiv\text{N}$ в исследуемых композитах, при этом наименьшими параметрами отличается материал КМ1.

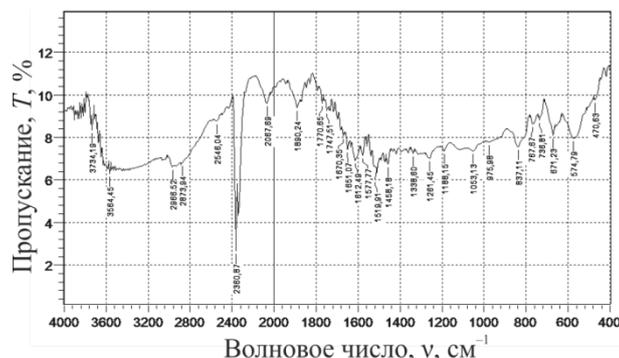


Рис. 1. ИК-спектр пластифицированной трихлорэтилфосфатом эпоксидной матрицы

образования новых связей) в диапазоне волновых чисел $\nu = 1056,99 \dots 374962 \text{ см}^{-1}$ на спектрах материалов КМ4-КМ6 не обнаружено (кроме волнового числа $\nu = 1793,80 \text{ см}^{-1}$). Отмечено лишь уменьшение параметров T , b , S (рис. 2) и смещение полос поглощения относительно спектра эпоксидной матрицы. При этом наименьшими параметрами (T , b , S) характеризуются полосы поглощения на спектре материала КМ5. Как отмечено выше – это свидетельствует об улучшенных свойствах материала относительно испытываемых КМ.

Дополнительно установлено возникновение на спектрах образцов КМ4-КМ6 полосы поглощения при волновом числе $\nu = 1793,80 \text{ см}^{-1}$, характерной для карбонильной группы $-C=O-$ (рис. 2), а одинаковые параметры (T , b , S) указывают на улучшенные свойства исследуемых материалов относительно матрицы.

Выводы

На основе проведения ИК-спектрального сравнительного анализа полос поглощения эпоксидной матрицы и разработанных композитов можно сделать вывод, что среди всего спектра исследуемых образцов повышенной степени сшивания, а, следовательно, и улучшенными физико-механическими и теплофизическими свойствами характеризуются материалы КМ1 и КМ5. Приведенные результаты исследований хорошо согласуются с результатами испытаний физико-механических и теплофизических свойств разработанных материалов. Исходя из этого для внедрения рекомендованы композитные материалы, состоящие из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 ($q = 100$ масс.ч.), пластифицированной трихлорэтилфосфатом ($q = 10$ масс.ч.) и наполненной частицами алюмината кальция (АК), хлорамина Б (ХАБ), совелитового порошка (СП) или углекислого кальция (УК) при различном содержании трехкомпонентной добавки ($q_1+q_2+q_3$), масс.ч. следующего состава: КМ1 – АК (70 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + СП (20 масс.ч.) и КМ5 – АК (30 масс.ч.) + ХАБ (4 масс.ч.) + УК (20 масс.ч.).

Список использованной литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: [учеб. пособие] / [М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.] ; под. ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
2. Технические свойства полимерных материалов :[учеб.-справ. пособие] / В.К. Крыжановский [и др.] ; под ред. В.К. Крыжановского. – [2-е изд., испр. и доп]. – СПб. : Профессия, 2007. – 235 с.
3. Стухляк П.Д. Эпоксидные композиты для защитных покрытий / П.Д. Стухляк. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 658 с.
5. Производство изделий из полимерных материалов : [учеб. пособие] / В.К. Крыжановский [и др.]; Под общ. ред. В.К. Крыжановского. – СПб. : Профессия, 2008. – 460 с.
6. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб: Профессия, 2012. – 624 с.
7. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2011. – 415 с.
8. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов : [учеб. пособ.] / И.П. Мийченко. – СПб. : Научные основы и технологии, 2012. – 374 с.
9. Крыжановский В.К. Технические свойства пластмасс : [учеб. пособие] / В.К. Крыжановский. – СПб. : Профессия, 2014. – 246 с.
10. Крыжановский В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс / В.К. Крыжановский. – СПб. : Науч. основы и технологии, 2009. – 203 с.
11. Дмитриев О.С. Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толстостенных ПКМ / О.С. Дмитриев, А.А. Черепихина, В.Н. Кириллов, А.В. Зуев // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 11. – С. 27-36.
12. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, Рос. акад. наук, Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, [и др.]. – М. : Наука, 1994. – 383 с.
13. Букетов А.В. Эпоксидні нанокompозити : монографія / А.В. Букетов, О.О. Сапронов, В.Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
14. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикompозитних матеріалів / А.В.Букетов., Стухляк П.Д., Кальба Є.М. – Тернопіль, Збруч, 2005. – 184с.
15. Букетов А.В. Улучшение теплофизических свойств композиционных материалов на основе пластифицированной эпоксидной матрицы путем введения огнеупорных мелкозернистых наполнителей различной физической природы / А.В. Букетов, А.А. Сапронов, А.В. Акимов, Н.В. Браило, Д.А. Зинченко // Механика композиционных материалов и конструкций – 2016. – № 2. – С. 254-268