


ЭПОКСИДТІ КОМПОЗИТТЕРДІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫРЫЛҒАН НАНОТОЛТЫРҒЫШТАРДЫҢ ӘСЕРІ

¹Л.К. Тастанова , ¹А.З. Бекешев, ²А.С. Мостовой, ³А.К. Жұмабекова, ¹Г.Д. Серікбаева

¹ Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан,

² Ю.Гагарин атындағы Саратов мемлекеттік техникалық университеті, Саратов қ., Ресей,

³ Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан

 Корреспондент-автор: lyazzatt@mail.ru

Бұл жұмыста өңделмеген және аминсірке қышқылымен функционалдырылған наноалмаздар (НА) мен алюминий нитридi (AlN) нанотолтырғыштарының эпоксидті композиттердің құрылымының қалыптасуына және сипаттамаларына әсері зерттелді. Сканерлеуші электронды микроскопиялық (СЭМ) талдау осы нанотолтырғыштардың морфологиясы мен агломерацияға күшті бейімділігін, яғни олардың дисперстілігін және полимер матрицасымен өзара әрекеттесуін жақсарту үшін түрлендіру қажеттілігін анықтады. НА және AlN аминсірке қышқылымен функционализациялау гелдену және катаю процестерін айтарлықтай жылдамдатады, бұл термометриялық сонымен қатар дифференциалдық сканерлеу калориметриясымен өлшенген нәтижелері көрсетті. Аталған зерттеулер композиттердің катаю температурасы және уақытымен қатар оның термиялық эффектісінің жоғарылауын көрсетті. Механикалық сынақтар аминсірке қышқылымен өңделген НА немесе AlN нанобөлшектерімен модификацияланған эпоксидті композиттер өңделмеген нанотолтырғыштар қосылған композиттермен салыстырғанда беріктік, серпімділік модулі және қаттылық бойынша айтарлықтай жақсартуларды көрсететінін анықтады. Сонымен қатар, зерттеулер аминсірке қышқылымен өңделмеген және модификацияланған НА және AlN нанобөлшектерінің қосылуы эпоксидті нанокомпозиттердің ыстыққа төзімділігі мен термиялық тұрақтылығын айтарлықтай жақсартатынын көрсетті. Алынған нәтижелер эпоксидті нанокомпозиттердің физикалық-механикалық қасиеттерін оңтайландыру үшін аминсірке қышқылымен өңдеудің тиімділігін көрсетті, бұл заманауи материалдарды дамыту үшін перспективалы жолдарды ашады.

Түйін сөздер: эпоксидті композит, нанотолтырғыш, модификациялау, наноалмаздар, алюминий нитридi, аминсірке қышқылы.

THE EFFECT OF FUNCTIONALIZED NANOFILLERS ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES

¹L. Tastanova , ¹A. Bekeshev, ²A. Mostovoy, ³A. Zhumabekova, ¹G. Serikbayeva

¹K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan,

²Yu. Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia,

³ Kazakh University of Technology and Business, Astana, Kazakhstan,
e-mail: lyazzatt@mail.ru

The study explores the impact of incorporating pristine and aminoacetic acid-functionalized nanofillers, specifically nanodiamonds (ND) and aluminum nitride (AlN), on the structure formation and performance of epoxy polymers. Scanning electron microscopy (SEM) analysis reveals the morphology and pronounced agglomeration tendencies of these nanofillers, underscoring the need for functionalization to improve their dispersion and interaction with the polymer matrix. The functionalization of ND and AlN with aminoacetic acid significantly accelerates the gelation and curing processes, as evidenced by thermometric and differential scanning calorimetry (DSC) studies, which show a reduction in curing times and temperatures along with enhanced thermal effects. Mechanical testing demonstrates that epoxy composites containing aminoacetic acid-treated ND and AlN exhibit marked improvements in strength, modulus, and impact resistance compared to those with pristine nanofillers. Moreover, the results show that the incorporation of ND and AlN nanoparticles, whether pristine or aminoacetic acid-modified, notably increases the heat

resistance and thermal stability of epoxy nanocomposites, with higher aminoacetic acid concentrations correlating with even greater improvements in these properties. These findings highlight the effectiveness of aminoacetic acid treatment in optimizing the physical and mechanical properties of epoxy nanocomposites, offering promising avenues for advanced material development.

Key words: epoxy composite, nanofiller, modification; nanodiamonds, aluminum nitride, aminoacetic acid.

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫХ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

¹Л. Тастанова ✉, ¹А. Бекешев, ²А. Мостовой, ³А.К. Жумабекова, ¹Г.Д. Серикбаева

¹ Актюбинский региональный университет им. К.Жубанова, г.Актобе, Казахстан,

² Саратовский государственный технический университет им. Ю.Гагарина, г.Саратов, Россия,

³ Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, г.Астана, Казахстан,

e-mail: lyazzatt@mail.ru

В работе изучено влияние включения необработанных и функционализированных аминокислотой нанонаполнителей - наноалмазов (НА) и нитрида алюминия (AlN), на формирование структуры и характеристики эпоксидных композитов. Анализ методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) выявил морфологию этих нанонаполнителей и выраженную склонность их к агрегации, что подчеркивает необходимость функционализации для улучшения их дисперсности и взаимодействия с полимерной матрицей. Функционализация НА и AlN аминокислотой значительно ускоряет процессы гелеобразования и отверждения, о чем свидетельствуют термометрические исследования и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), которые показывают сокращение времени и температуры отверждения наряду с усилением теплового эффекта. Механические испытания показали, что эпоксидные композиты, содержащие НА и AlN, обработанные аминокислотой, демонстрируют заметное улучшение прочности, модуля упругости и ударной вязкости по сравнению с композитами с нетронутыми нанонаполнителями. Кроме того, выявлено, что включение наночастиц НА и AlN, как чистых, так и модифицированных аминокислотой, значительно повышает теплостойкость и термостабильность эпоксидных нанокомпозитов, причем более высокие концентрации аминокислоты приводят к большему улучшению этих свойств. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности обработки аминокислотой для оптимизации физико-механических свойств эпоксидных нанокомпозитов, что открывает перспективные пути для разработки современных материалов.

Ключевые слова: эпоксидный композит; нанонаполнитель; модификация; наноалмазы; нитрид алюминия, аминокислотная кислота.

Кіріспе. Эпоксидті шайыр негізіндегі композиттер әртүрлі өнеркәсіптік қолданбаларда жоғары бағаланады, себебі олардың қасиеттерінің ерекше үйлесімі, соның ішінде жоғары диэлектрик сипаттамалары, механикалық беріктігінің жоғарылауы, суға төзімділігі, агрессивті ортаға төзімділігінің жоғары болуы, минималды тор түзілу кезіндегі шөгуді және әртүрлі материалдарға күшті адгезиясы байқалады. Бұл атрибуттар эпоксидті композиттерге минералды байланыстырғыштар мен полиэфир, фуран және мочевиная негізіндегі материалдар сияқты басқа

синтетикалық шайырлардан тұратын дәстүрлі композициялардан асып түсуге мүмкіндік береді [1,2]. Бұл композиттерді белгілі бір өнімділік талаптарына бейімдеу үшін көбінесе пластификаторлар мен толтырғыштар қосылады. Пластификаторлар полимерлі материалдарға серпімділік береді және олардың шыныға өту температурасын өзгертеді, ал толтырғыштар композиттердің механикалық және физика-химиялық қасиеттерін арттырады.

Әртүрлі модификациялаушы қоспалар мен

толтырғыштары қосу полимерлі композиттік материалдардың және олардан алынатын өнімдердің функционалдық сипаттамаларын жақсартудың кеңінен таралған стратегиясы болып табылады [3-5]. Маңызды зерттеу жұмыстары полимерлі матрицаны әртүрлі минералды толтырғыштармен өзгерту арқылы жаңа эпоксидті композиттерді жасауға бағытталған [6-9]. Жиі қолданылатын минералды ұсақ дисперсті толтырғыштарға тальк, базальт және хромит жатады. Дегенмен, минералды толтырғыштар мен полимерлі матрицалар арасындағы адгезияның төмендігіне, сондай-ақ минералды материалдардың агломерацияға бейімділігіне байланысты қасиеттердің күтілетін жақсаруы жиі күткендей болмайды.

Эпоксидті матрицаға спецификалық қасиеттері бар нанотолтырғыштарды енгізу арқылы полимерлі композициялардың наноқұрылымдық сипаттамаларын бақылау арқылы бейімделген қасиеттері бар композиттерді құру әлеуеті функционалды полимерлі материалдардың ассортиментін кеңейтудің перспективалы жолы болып табылады [10-12]. Бұл тәсіл эпоксидті шайырлардың сынғыштығы сияқты мәселелерді шешуге мүмкіндік береді, осылайша берік және бейімделгіш композиттік материалдарды жасауға мүмкіндік береді. Осы саладағы жүргізіліп жатқан зерттеулер полимерлі композиттердің жаңа мүмкіндіктерін ашу үшін, әсіресе өнеркәсіптік талаптарға сәйкес болуы өте маңызды.

Полимерлі нанокомпозиттердің қасиеттерін едәуір арттырудың негізгі міндеті полимер матрицасында нанобөлшектердің толық дисперсиясына қол жеткізу болып табылады. Өтпелі немесе трансшекаралық қабат деп аталатын үлкен фазааралық аймақтың пайда болуы нанобөлшектердің біркелкі таралуын қиындатады, бұл агрегацияға әкеледі. Бұл композиттік материалдың біркелкі емес қасиеттеріне және өнімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Сондықтан нанобөлшектердің біртекті дисперсиясына қол жеткізу нанокомпозиттік материалдардың артықшылықтарын толық жүзеге асыру үшін өте маңызды.

Осы мәселені шеше отырып, нанокомпозиттердегі қазіргі зерттеулердің көпшілігі біркелкі

таралуға қол жеткізу және агрегацияның алдын алу үшін нанобөлшектерді өңдеу мен таратудың тиімді стратегияларын әзірлеуге бағытталған [3-5]. Бұл стратегиялар көбінесе матрица мен нанобөлшектердің өзара әрекеттесуін жақсартуға бағытталған озық әдістерді қамтиды, осылайша нанокомпозиттің жалпы қасиеттерін жақсартады.

Нанобөлшектердің агрегациясын азайту және адгезиялық қасиеттерін жақсарту үшін наноматериалдарды функционализациялау және композиттерді физикалық түрлендірудің тиімді әдістерін жасау өте маңызды. Толтырғыш бетін толтырғыш пен полимер матрицасы арасындағы химиялық әрекеттесулерді жеңілдететін қосылыстармен функционализациялау толтырғыштың полидисперстілігін төмендетіп, эпоксидті композиттердің физикалық-механикалық қасиеттерін жақсарты алады [13,14]. Аминсірке қышқылы олигомердің эпоксидті топтарымен және нанотолтырғыштармен әрекеттесетін карбон топтарымен әрекеттесетін амин топтарының арқасында тиімді функционализациялаушы агент болып шықты.

Полимер матрицасындағы нанотолтырғыштардың тиімді дисперсиясын қамтамасыз ету полимер байланыстырғыштың едәуір бөлігінің шекаралық қабатқа, тіпті толтырғыштың төмен концентрациясында (1%-дан аз) өтуін жеңілдетуі мүмкін. Мысалы, эпоксидті матрицаға тек 1% аммиак-су функционалды графен оксидін қосу композиттің созылу беріктігін де, иілу беріктігін де екі есе арттыратыны көрсетілген. Сонымен қатар, композиттің созылу модулі толтырылмаған эпоксидті полимермен салыстырғанда 1,5 есе өсті, бұл нанотолтырғыштың механикалық сипаттамасына айтарлықтай әсерін көрсетеді [15].

Тағы бір зерттеуде зерттеушілер полимерлі матрицаны полиэфирамин және алюминий нитридiмен (AlN) жұмыс істейтін графеннің кванттық нүктелерiмен өзгерту арқылы композиттің жылу өткізгіштігін арттырды. Осы функционалды наноматериалдардың 20% - н қосу жылу өткізгіштіктің бастапқы өзгертілмеген матрицадан 6,89 есе жоғары мәніне әкелді [16]. Бұл нанотолтырғыштардың механикалық қасиеттерін

жақсарту үшін ғана емес, сонымен қатар жылулық сипаттамаларын арттыру үшін де әлеуетін көрсетеді, бұл материалдарды жылуды тиімді таратуды қажет ететін қолданбалар үшін қолайлырақ етеді.

Осыған ұқсас жетістіктерге басқа зерттеулерде де қол жеткізілді, мысалы, AlN және BN гибриді толтырғыштарын пайдалану, ол эпоксидті жабынның жылу өткізгіштігін 46 есе арттырды, сонымен бірге $22,56 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ төмен термиялық кеңею коэффициентін сақтайды [17].

Сонымен қатар, наноалмаздар (НА) жоғары беріктігі, жоғары жылу өткізгіштігі, тамаша оптикалық қасиеттері және биоүйлесімділігі арқасында матрицаны өзгертетін құнды компонент ретінде пайда болды. Зерттеулер көрсеткендей, НА функционализациясы композиттік материалдардың жылу өткізгіштігін де, сынуға төзімділігін де айтарлықтай жақсарты алады, бұл механикалық сипаттамаларын жақсартуда жақсы дисперсті наноқұрылымдардың тиімділігін көрсетеді [18, 19-20].

Осы жетістіктерге қарамастан, толтырғыштың төменірек концентрациясында және жергілікті өндірістің үнемді материалдарын пайдалана отырып, қажетті қасиеттерді жақсарту мәселелері әлі де қалып отыр. Нанотолтырғыштарды пайдалануды оңтайландыру және өнімділікті жақсартуды экономикалық және практикалық ойлармен теңестіретін өңдеу әдістерін әзірлеу үшін қосымша зерттеулер қажет. Зерттелетін тәсілдердің бірі полимер матрицасымен үйлесімділікті жақсарту және тиімді дисперсияны қамтамасыз ету үшін нанотолтырғыштарды аминсірке қышқылымен химиялық модификациялау болып табылады. Нанотолтырғыштардың нақты модификациясына назар аудары отырып және олардың полимер матрицасымен өзара әрекеттесуін түсіне отырып, бұл зерттеу алдыңғы зерттеулердің шектеулерін еңсеруге және жоғары өнімділікті үнемділікпен және өңдеудің қарапайымдылығымен үйлестіретін композиттік материалдарды әзірлеуге бағытталған.

Осы жұмыста зерттелетін зерттеу бағытарының бірі аминсірке қышқылымен химиялық түрлендірілген нанотолтырғыштардың аз мөл-

шерін енгізу арқылы эпоксидті шайыр негізіндегі полимерлі матрицаның айтарлықтай нығаюына қол жеткізуді қамтиды. Нанотолтырғыштардың нақты модификациясына назар аудары отырып және олардың полимер матрицасымен өзара әрекеттесуін түсіне отырып, бұл зерттеу алдыңғы зерттеулердің шектеулерін еңсеруге және жоғары өнімділікті үнемділікпен және өңдеудің қарапайымдылығымен үйлестіретін композиттік материалдарды әзірлеуге бағытталған. Бұл тәсіл күштірек және берік қана емес, сонымен қатар қауіпсіз және экологиялық таза озық материалдарды жасауға мүмкіндік береді.

Материалдар мен әдістер. ЭД-20 эпоксидті шайыры chimex Limited (Санкт-Петербург, Ресей) компаниясынан алынды. Амин түріндегі қатайтқыш - chimex Limited компаниясы шығарған полиэтилен полиамині (ПЭПА). 95-99% тазалық дәрежесі бар трихлоропропилфосфат – пластификатор (ТХПФ) Xuancheng City Trooyawn Refined Chemical Industry Co Компаниясынан алынды., Ltd. (Қытай).

Бұл зерттеудегі эпоксидті композицияның құрамы эксперименттік сынақтар арқылы мұқият оңтайландырылды. Эпоксидті олигомердің пластификатор мен қатайтқышқа қатынасы салмағы бойынша 100 бөлік (м.ү.) ЭД-20, 40 м.ү. ТХПФ және 15 м.ү. ПЭПА [21,22]. Бұл нақты тұжырым композицияның механикалық беріктіктің, термиялық тұрақтылықтың және отқа төзімділіктің қажетті тепе-теңдігін көрсетуін қамтамасыз етеді.

Наноалмаздар (НА) және алюминий нитридтері (AlN) құрылымды өзгертетін бірегей әсерлерін пайдалану үшін салмағы бойынша 1%-ға дейін аз мөлшерде қосылды.

Нанотолтырғыштар мен эпоксидті матрица арасындағы өзара әрекеттесуді одан әрі күшейту үшін толтырғыш нанобөлшектерінің беті аминсірке қышқылының (АСК) көмегімен функционалдандырылды (VitaReactiv LLC, Держинск, Ресей). Наноалмаздар мен алюминий нитридінің беті аминсірке қышқылымен өңделген. Осы мақсатта ультрадыбыстық гомогенизатордың көмегімен 50 мл H₂O-аминсірке қышқылының ерітіндісінде 15 минут ішінде 0,25 г тиісті толты-

рғыш дисперсті болды; аминсірке қышқылының концентрациясы 2,5%, 5,0%, 7,5% және 10,0% құрады. Содан кейін суспензияны 12 сағат бойы 100 айн/мин жылдамдықпен тұрақты төмен жылдамдықта араластыра отырып 80°C температурада рефлюкске ұшырады. Нанотолтырғыш бөлшектерінің айналасындағы артық аминсірке қышқылын кетіру үшін суспензия центрифугадан өткізіліп, тазартылған сумен екі рет жуылды. Содан кейін алынған өнім 80 °C температурада 5 сағат кептірілді.

Таралу біркелкілігін арттыру және NA және AlN бөлшектерінің агрегациясын болдырмау, сондай-ақ олардың беті мен байланыстырғышын белсендіру үшін композицияны ультрадыбыстық өңдеу қолданылды. Ультрадыбыстық өңдеу параметрлері: жиілігі-22±2 кГц, қуаты - 400 Вт, ұзақтығы - 60 мин. Қоспа вакуумда 25 ± 5 °C температурада 30 минут ішінде газсыздандырылды.

NA және AlN бөлшектерінің морфологиясы Tescan Vega 3 SBH сканерлеуші электронды микроскоптың көмегімен зерттелді (Брно, Чехия).

Созылу және иілу беріктігін анықтау үшін Time Group Inc компаниясы шығарған WDW-5E сынақ машинасы пайдаланылды (Пекин, Қытай). Созылудың беріктік шегі және иілудің серпімділік модулін анықтау үшін үлгілер сәйкесінше 5 және 50 мм/мин жылдамдығымен сыналды. Иілу кезіндегі созылу беріктігі мен иілу кезіндегі серпімділік модулін анықтау үшін үлгілер [23] бойынша сыналды, сынақтар қалыңдығы 4 мм, ені 10 мм және жұмыс ұзындығы 80 мм блоктар түріндегі үлгілерде жүргізілді. Созылу беріктігінің шегі мен созылудың серпімділік модулін анықтау үшін үлгілер [24] сәйкес сыналды, сынақтар қалыңдығы 4 мм, ені 10 мм және жұмыс бөлігінің ұзындығы 50 мм шпатель түріндегі үлгілерде жүргізілді. Соққыға төзімділігін анықтау үшін [25] сәйкес LCT-50D сынақ станді (Beijing United Test Co., Ltd.), Пекин, Қытай) пайдаланылды.

Вик бойынша жылуға төзімділікті [26] әдісіне сәйкес анықтады, B50 әдісі – жүктеме 50 Н; температураның көтерілу жылдамдығы 50 °C/сағ. Термогравиметриялық талдау Q-1500D дериватографында (Будапешт, Венгрия) жүргізілді.

Салмағы 100 мг үлгілер 10°C/мин жылдамдықпен 800°C дейін қыздырылды. Талдау ауада жүргізілді және салыстырмалы қателік 1% - дан аспады. Бұл талдауда үлгілерді қыздыру кезінде массаның өзгеруі, массаның өзгеру жылдамдығы және жылу эффектілері зерттелді.

Қатайту процестерінің кинетикасын дифференциалды сканерлеуші калориметрия (ДСК) әдісімен «ДТАС-1300» құралында келесі шарттарда зерттелді: сынама массасы - 20 мг, қыздыру аралығы - 400°C дейін, қыздыру жылдамдығы - минутына 16 градус. ДСК әдісінен басқа, $G = f(\tau, T)$ тәуелділігін сызу арқылы құрылымның қалыптасу процестерін зерттеу үшін термометриялық әдіс қолданылды, мұндағы τ -процестің ұзақтығы (м); T-температура (C). Бұл талдауда объектілердің жылудан оқшаулануы қамтамасыз етілді. Бұл жылу берудің катаю процесіне әсерін зерттеуге мүмкіндік берді.

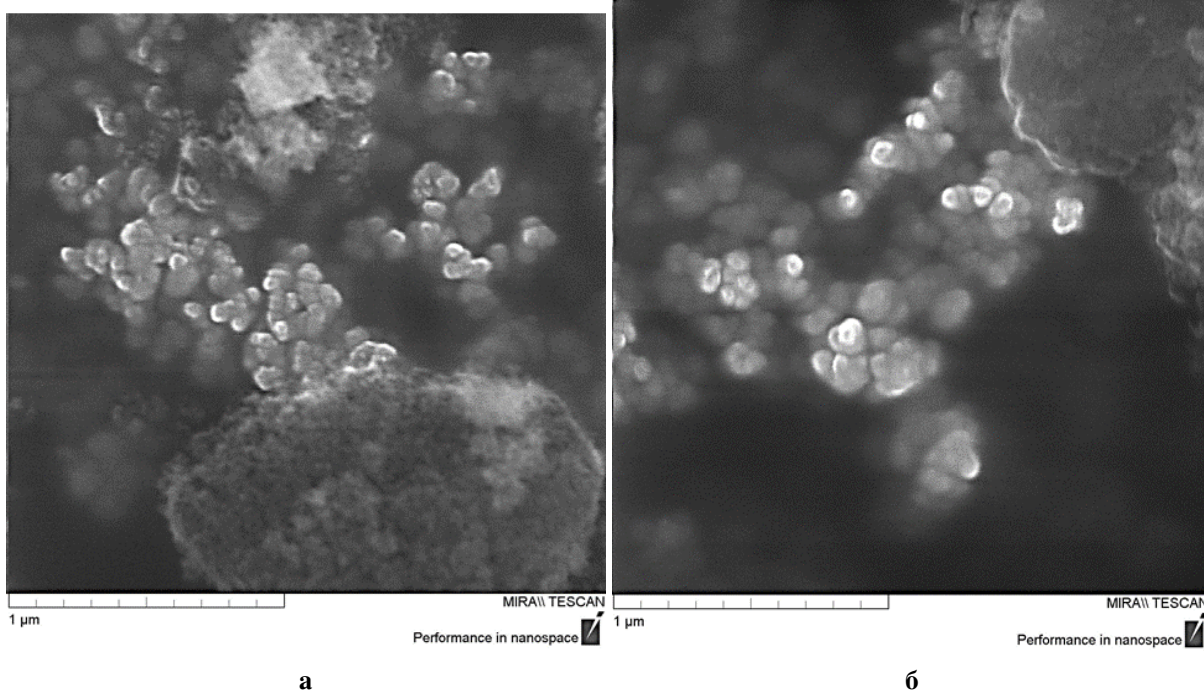
Эпоксидті нанокомпозиттерді сынау келесі әдістерді қолдану арқылы жүргізілді:

- иілу кезіндегі иілу кернеуін және серпімділік модулін анықтау [27],
- созылу кезіндегі беріктік шегі және серпімділік модулін анықтау [24];
- соққыға төзімділікті анықтау [25];
- Вик бойынша жылуға төзімділігін анықтау [26];
- жылу өткізгіштік пен жылу кедергісін анықтау ITP-MG4 "100" құрылғысында жүргізілді [28];
- эпоксидті құрамның катаю кинетикасын анықтау [29] сипатталған әдіс бойынша жүргізілді.

Нәтижелер және талқылау. Наноалмаз және алюминий нитридінің SEM кескіндері 1-суретте көрсетілген. Наноалмаз бөлшектері сфералық морфологияны көрсетеді (1a-сурет). Құрылымдық жағынан бұл бөлшектер көміртегі құрамдас бөлігі ретсіз көміртегі қабығымен қоршалған алмаз өзегінен тұратын алып молекулаларға ұқсайды. Бұл қабық одан әрі беткі көміртегі атомдарының компенсацияланбаған валенттіліктерінде локализацияланған беттік функционалды топтармен байланысты. Наноалмаздардың беткі қабатындағы полярлық топтардың көптігі олардың күрделі коллоидты-химиялық қасиеттеріне ықпал етіп,

бөлшектердің едәуір агломерациясына әкеледі. Бұл агломерация 500-ден 1000 нм-ге дейінгі өлшемдегі, ал жеке бөлшектердің өзі 10-50 нм наноөлшемді диапазонда қалады. AlN бөлшектері (1b-сурет) өлшемі 500-ден 2000 нм-ге дейінгі үлкен агрегаттар түрінде пайда болады, олар өлшемдері 100-ден 300 нм-ге дейінгі қабыршақ тәрізді ұсақ бөлшектерден тұрады. Бұл ұсақ бөлшектер олардың дұрыс емес пішінді жиектерімен сипатталады.

Зерттелетін наноматериалдар бөлшектерінің өлшемдері мен құрылымын талдау агломерацияға айқын бейімділікті анықтады, бұл осы бөлшектерді қамтитын полимерлі композиттердің беріктік сипаттамаларының минималды жоғарылауына әкелуі мүмкін. Бұл нәтижелер агломерацияны азайту және полимер матрицасы/нанобөлшек шекарасында химиялық әрекеттесулерді күшейту үшін нанобөлшектерді функционализациялаудың маңыздылығын көрсетеді.



1-сурет. Наноалмаз (а) және алюминий нитридінің (б) бөлшектерінің СЭМ бейнелері. 100 000 есе үлкейтілген

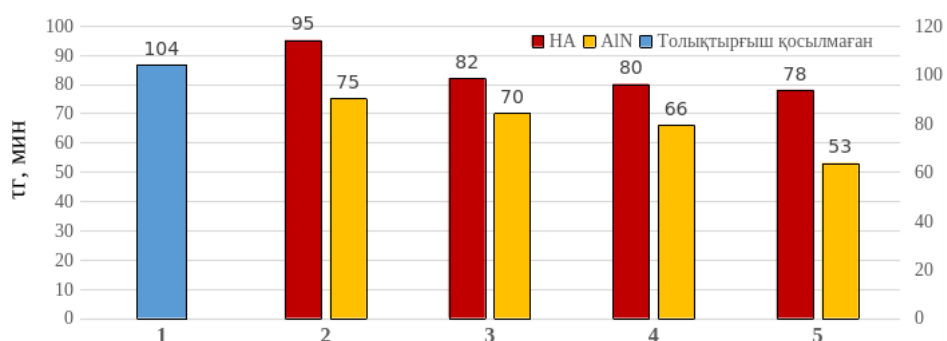
Модификациялайтын қоспалардың торлы полимерлерге әсерін бағалау кезінде қатаю процесі наноалмаздар (НА) және алюминий нитридтері (AlN) сияқты қатты материалдардың дамыған беті болған кезде жүретінін ескеру қажет. Бұл қатты беттер қатаю кезінде полимерлену реакциясының кинетикалық сипаттамаларына, сондай-ақ материалдың фазалық құрылымының қалыптасуына айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Бұл процестерде олигомерлі компоненттер мен НА және AlN -нің қатты беттері арасындағы адсорбциялық өзара әрекеттесу шешуші рөл атқарады. Қатаю кезінде құрылымның түзілуіне

таза және модификацияланған НА және AlN-нің әсері байқалды (2-сурет).

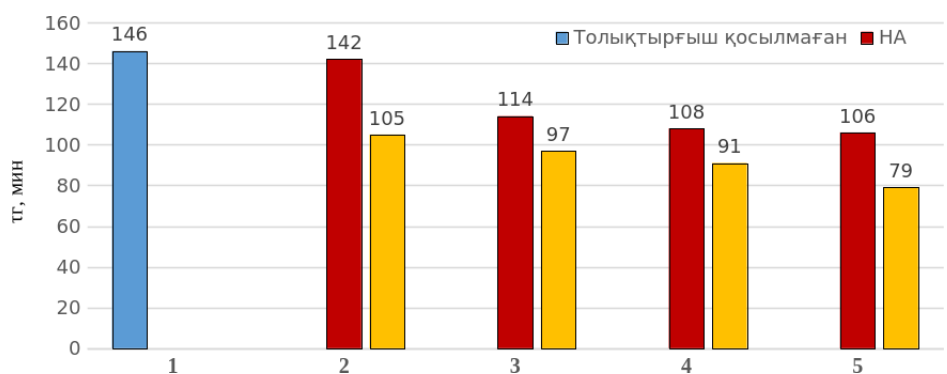
Эпоксидті құрамға таза НА қосу полимерлену процесін жылдамдатуға әкелді, бұл гельдену уақытының 104-тен 95 минутқа дейін (2а-сурет) және қатаю уақыты 146-дан 142 минутқа дейін (2б-сурет) қысқаруымен, сонымен қатар өздігінен қызудың максималды температурасының 88-ден 110°C-қа дейін жоғарылауымен дәлелденді (2с-сурет). Полимерленудің бұлай үдетілуі жылудың көбірек бөлінуімен бірге, полимерлену процесіне НА белсенді қатысатынын болжауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, эпоксидті

құрамға аминсірке қышқылымен функционалданған НА енгізілгенде, реакцияға қабілетті амин топтарының қатысуына байланысты полимерлеу процесі одан әрі жеделдетілді. Бұл гельдену уақытының 78-82 минутқа дейін қысқаруына

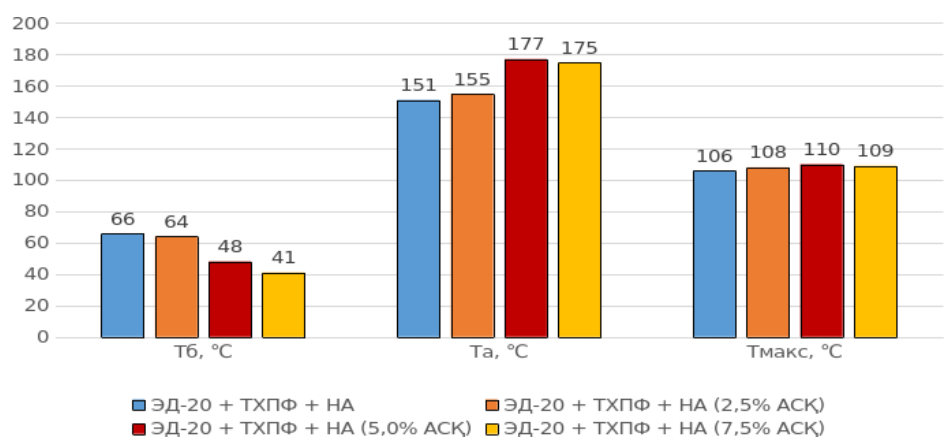
және қатаю уақытының 106-114 минутқа дейін қысқаруына әкелді, өздігінен қызудың максималды температурасы 115-122°C дейін көтерілді (2а-с суреттер).



а



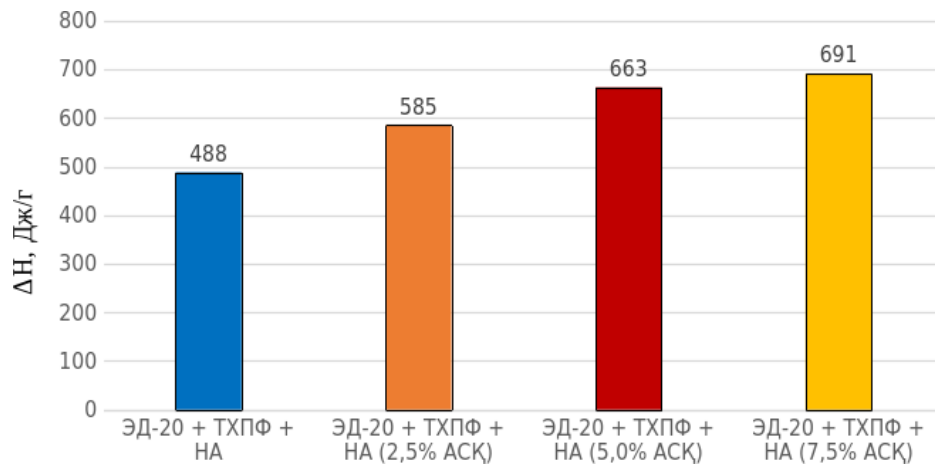
б



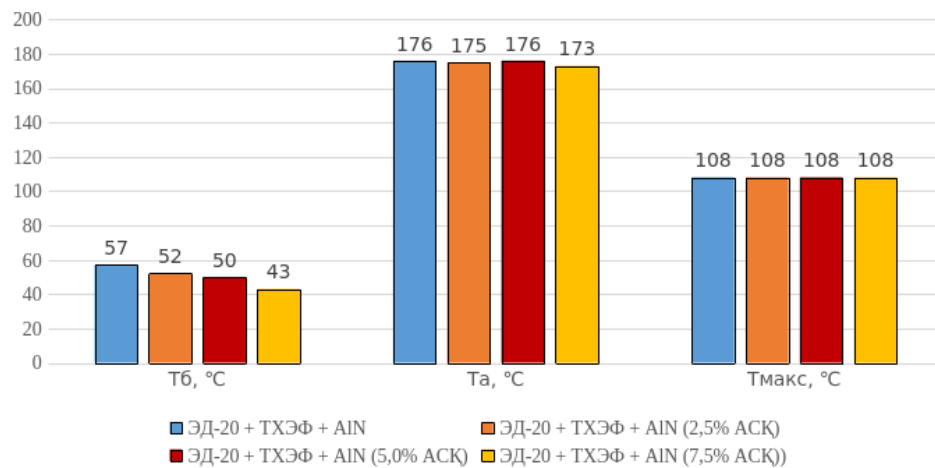
с

2 - сурет. Эпоксидті композициялардың қатаю процесінің сипаттамалары: а-гельдену уақыты, в-қатаю уақыты, с-қатаю кезінде үлгінің өздігінен қызуының максималды температурасы:

- 1 – ЭД-20 + ТХПФ + ПЭПА,
 2 – ЭД-20 + ТХПФ + өңделмеген толтырғыш + ПЭПА,
 3 – ЭД-20 + ТХПФ + толтырғыш (2.5% аминсірке қышқылы) + ПЭПА,
 4 – ЭД-20 + ТХПФ + толтырғыш (5.0% аминсірке қышқылы) + ПЭПА,
 5 – ЭД-20 + ТХПФ + толтырғыш (7.5% аминсірке қышқылы) + ПЭПА



а



б

3 - сурет. Наноалмазбен модификацияланған эпоксидті композиттердің қатаю процесінің сипаттамалары: а) қатаю процесінің басталу температурасы (T_b), аяқталу температурасы (T_a) және қатаю кезінде максималды жылу шығару температурасы (T_{max}); б) реакция энтальпиясы

Осы сияқты, эпоксидті құрамға таза АIN енгізу полимерлеу процесін тездетіп, гельдену уақытын 104-тен 75 минутқа дейін (2a-Сурет) және қатаю уақытын 146-дан 105 минутқа дейін (2b-сурет) қысқартты, сонымен бірге

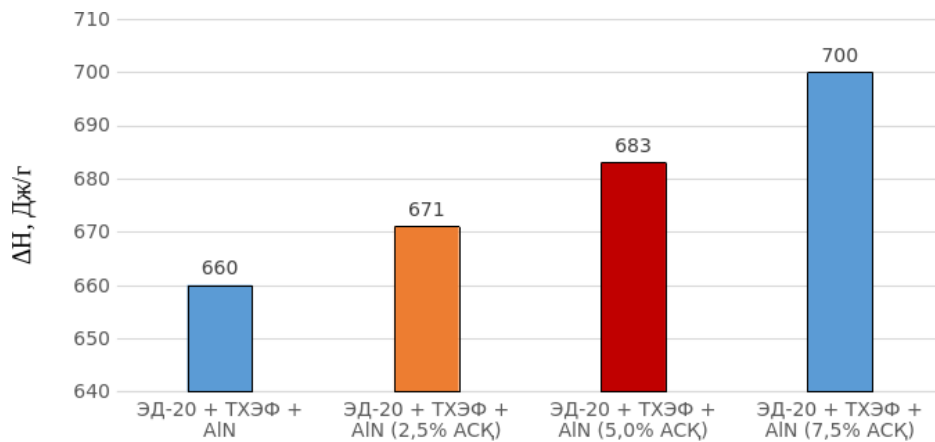
өздігінен қызудың максималды температурасын 88-ден 105°C-қа дейін жоғарылатты (2c-сурет). Аминсірке қышқылымен функционалдандырылған АIN қосылған кезде полимерлеу процесі одан әрі жетілдірілді, бұл гельдену уақытының

53-70 минутқа дейін және қатаю уақытының 79-97 минутқа дейін қысқаруымен және максималды өздігінен қыздыру температурасы 120-128°C дейін көтерілуімен қатар жүрді (2а-с суреттер).

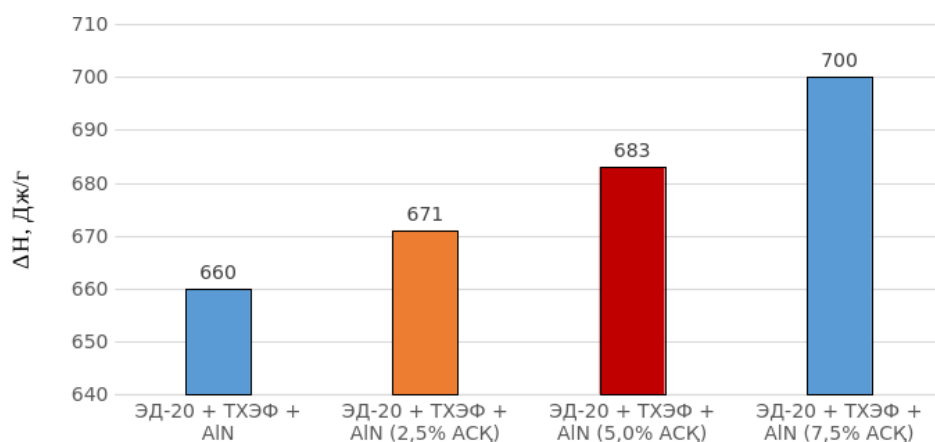
Алынған деректерді талдау құрамында модификацияланған НА және AlN бар эпоксидті композиттердегі амин сірке қышқылы концентрациясының жоғарылауы құрылымның түзілу процесін жеделдететінін көрсетеді, бұл тиімдірек қатаюға және термиялық қасиеттердің жақсаруына әкеледі.

Эпоксидті композиттердің қатаю кинетикасын термометриялық әдістерді қолдана отырып зерт-

теу нәтижесінде алынған мәліметтер негізінде бастапқы және модификацияланған наноалмаздар мен алюминий нитридінің қатаю кезінде құрылым түзілуіне әсері анықталды. Эпоксидті матрицаға аминсірке қышқылымен функционалдандырылған нанобөлшектерді қосу полимерлеу процесін едәуір жылдамдатады. Бұл жеделдету полимерлену реакциясына реакцияға қабілетті амин топтарының қатысуына байланысты геледену уақыты мен қатаю уақытының қысқаруымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, композициялардың өзін-өзі қыздыруының максималды температурасының жоғарылауы байқалды (3,4-суреттер).



а



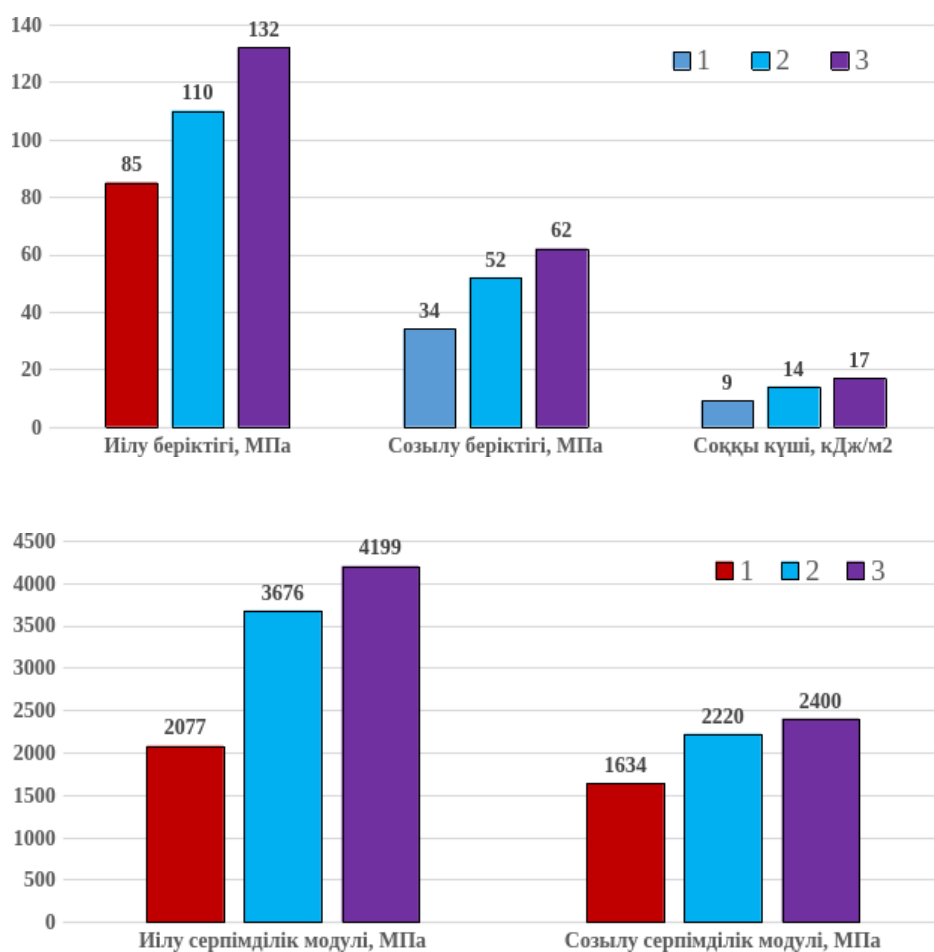
б

4-сурет. AlN-мен модификацияланған эпоксидті композиттердің қатаю процесінің сипаттамалары: а) қатаю процесінің басталу (T_0), аяқталу (T_a) температуралары және қатаю кезінде максималды жылу шығару температурасы ($T_{\text{макс}}$); б) реакция энтальпиясы

Деректерді одан әрі талдау аминсірке қышқылы концентрациясының жоғарылауы модификацияланған нанобөлшектері бар эпоксидті композиттердегі құрылымның түзілу жылдамдығын арттыратынын көрсетеді. Бұл нәтижелер дифференциалды сканерлеу калориметриясымен расталады, бұл эпоксидті құрамға аминсірке қышқылымен өңделген наноалмаздарды енгізу қатаю реакциясының энтальпиясын 488 Дж/г-ден 588-691 Дж/г диапазонына дейін арттыратынын көрсетеді. Энтальпияның бұл жоғарылауы, қатаюдың басталу температурасының 66°C-тан 41-64°C-қа дейін төмендеуімен бірге (3-суретте көрсетіл-

гендей), функционалданған нанобөлшектермен жеңілдетілген қатаю процесінің басталуы мен жеделдеуін растайды.

Эпоксидті құрамға аминсірке қышқылымен өңделген алюминий нитридінің қосылуы қатаю реакциясының энтальпиясын 660 Дж/г-ден 671-700 Дж/г диапазонға дейін айтарлықтай жоғарылатуға алып келеді. Бұл модификация сонымен қатар қатаю процесін тиімдірек бастайды, бұл қатаюдың басталу температурасының 57°C-тан 43-52°C диапазонына дейін төмендеуімен дәлелденеді (4-суретті қараңыз).



5-сурет. Эпоксидті композиттердің қасиеттері: 1-ЭД-20+ТХПФ+ПЭПА; 2-ЭД-20+ТХПФ+НА + ПЭПА; 3 - ЭД-20+ТХПФ+НА (аминсірке қышқылы)+ПЭПА

Дифференциалды сканерлеу калориметриясын қолдана отырып, эпоксидті композициялар бойынша зерттеу нәтижелерін талдау эпоксидті құрамға аминсірке қышқылымен жұмыс істей-

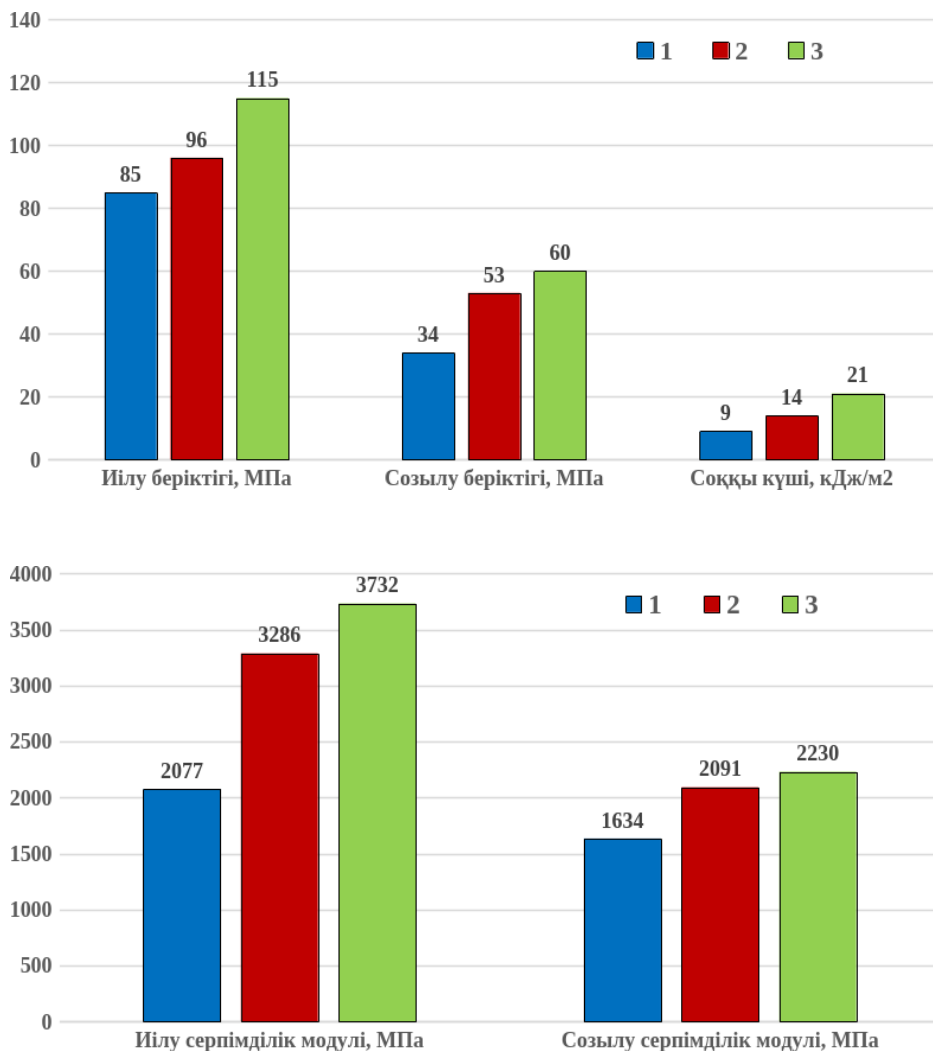
тін нанобөлшектерді қосу полимерлеу процесін күшейтетінін көрсетеді. Бұл полимерлену реакциясына реакцияға қабілетті амин топтарының қатысуына байланысты, және ол қатаюдың ба-

стапқы температурасының төмендеуіне әкеледі. Сонымен қатар, полимерлену реакциясының жылдық әсерінің жоғарылауы байқалады. Сондай-ақ, аминсірке қышқылының жоғары концентрациясы модификацияланған нанобөлшектері бар эпоксидті композиттер құрылымының түзілуін тездетеді.

5 және 6-суреттерде наноалмаз (НА) және алюминий нитридінің (AlN) бөлшектері бар эпоксидті нанокомпозиттердің деформациялық және беріктік сипаттамалары көрсетілген.

Эпоксидті матрицаға НА қосу оның механикалық қасиеттерін айтарлықтай жақсартады.

Иілу беріктігі бастапқы эпоксидті полимердегі 85 МПа-дан 110 МПа-ға дейін, серпімділік модулінің 2077 МПа-дан 3676 МПа-ға дейін айтарлықтай өсуімен бірге жүреді. Сонымен қатар, созылу беріктігі 34 МПа-дан 52 МПа-ға дейін көтеріледі, сәйкесінше созылу кезіндегі серпімділік модулінің 1634 МПа-дан 2220 МПа-ға дейін жоғарылауы байқалады. Бір қызығы, эпоксидті полимерлер үшін маңызды болып табылатын соққыға төзімділік те жақсарады, соққы күші 9 кДж/м²-ден 14 кДж/м²-ге дейін артады (5-сурет). Соққыға төзімділіктің бұл жоғарылауы эпоксидті композиттердің сынғыштығын ескере отырып, олардың дәстүрлі түрде қолданылуын шектейді.



6-сурет. Эпоксидті композиттердің қасиеттері: 1 - ЭД-20 + ТХПФ + ПЭПА; 2 - ЭД-20 + ТХПФ + AlN + ПЭПА; 3 - ЭД-20 + ТХПФ + AlN(аминсірке қышқылы) + ПЭПА

Сонымен қатар, эпоксидті композицияға аминсірке қышқылымен өңделген НА қосу композиттің тасымалдау сипаттамаларын одан әрі арттырады. Бұл өңдеу иілу беріктігінің 132 МПа-ға дейін айтарлықтай артуына әкеліп соғады, ал иілу кезінде серпімділік модулі 4199 МПа-ға дейін артады. Созылу беріктігі де 62 МПа-ға дейін артады, созылу кезіндегі серпімділік модулі 2400 МПа-ға жетеді, ал соққыға төзімділік $17,2 \text{ кДж/м}^2$ -ге дейін айтарлықтай жақсарады.

6-суретте алюминий нитриді (AlN) қосылған эпоксидті нанокөпозиттер үшін ұқсас мәліметтер келтірілген. AlN енгізу композиттің механикалық қасиеттерін жақсартады. Иілу беріктігі бастапқы эпоксидті полимердегі 85 МПа-дан 96 МПа-ға дейін артады, ал серпімділік модулі 2077 МПа-дан 3286 МПа-ға дейін артады. Созылу беріктігі де 34 МПа-дан 53 МПа-ға дейін жақсарады, созылу кезіндегі серпімділік модулі 1634 МПа-дан 2091 МПа-ға дейін артады. Соққы күші 9 кДж/м^2 -ден 14 кДж/м^2 -ге дейін айтарлықтай артады.

AlN-н аминсірке қышқылымен өңдеп, эпоксидті құрамға қосқанда, алынған нанокөпозиттер жоғары механикалық қасиеттерді көрсетеді. Атап айтқанда, иілу беріктігі 115 МПа-ға дейін артады, иілу кезінде серпімділік модулі 3732 МПа-ға дейін көтеріледі, созылу беріктігі 60 МПа-ға жетеді, созылу кезіндегі серпімділік модулі 2230 МПа-ға дейін артады, ал соққы беріктігі $21,0 \text{ кДж/м}^2$ -ге дейін артады.

Нанобөлшектердің құрылымдық әсері қоспалардың шағын деңгейлерінде де айқын көрінеді. Полимерлер табиғаты бойынша микрогетерогенді болып табылады, олардың құрамында тығыз оралған, реттелген аймақтар да, әлсіз, ақаулы аймақтар да бар. Наномодификаторлар осы ақаулы аймақтарда локализациялануға бейім, олар маңызды құрылымды-модификациялаушы рөл атқаруы мүмкін. Бұл локализация полимер тізбектерінің қозғалғыштығын арттыра отырып, полимердің кинетикалық ынталандырылған реттелуіне ықпал етеді және тығыз орауға мүмкіндік береді.

1-кесте. Нанобөлшектердің және аминқышқылының әртүрлі концентрацияларының эпоксидті нанокөпозиттердің жылулық төзімділігіне әсері

Композит құрамы, м.ү., (15 м.ү. ПЭПА қатайтылған)	Жылуға төзімділік температурасы, оС
100ЭД-20 + 40ТХПФ	110
НА мен модификацияланған эпоксидты құрамдар	
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,01НА	132
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,05НА	136
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,10НА	142
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,50НА	146
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,1НА (2,5% аминсірке қышқылы)	146
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,1НА (5,0% аминсірке қышқылы)	156
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,1НА (7,5% аминсірке қышқылы)	166
AlN мен модификацияланған эпоксидты құрамдар	
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,01AlN	148
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,05AlN	152
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,1AlN	154
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,5AlN	168
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,05 AlN (2,5% аминсірке қышқылы)	160
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,05 AlN (5,0% аминсірке қышқылы)	174
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,05 AlN (7,5% аминсірке қышқылы)	182

Энергетикалық тұрғыдан алғанда, эпоксидті композиттерді нанобөлшектерді (НА және AlN) енгізу арқылы күшейту материалды жоюға қажетті энергияның жоғарылауымен түсіндіріледі. Энергияның бұл ұлғаюы жарықшақтың айналасындағы нанобөлшектер ағынымен және жарықшақ фронтының ұзаруына байланысты жарықшақ жолының бойында жаңа беттің пайда болуымен байланысты.

Нанобөлшектердің әртүрлі концентрацияларының әсерінің жиынтық нәтижелері, сондай-ақ аминқышқылының әртүрлі концентрацияларымен функционалданған нанобөлшектердің эпоксидті наноккомпозиттердің жылулық төзімділігіне әсері 1-кестеде көрсетілген.

Эпоксидті құрамға 0,01-ден 0,5 Вт-қа дейінгі мөлшерде таза наноалмаздарды енгізу эпоксидті композиттің ыстыққа төзімділігін 110°C-тан 132-146°C-қа дейін арттыруды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, аминсірке қышқылымен өңделген наноалмаздарды қосу эпоксидті композиттің ыстыққа төзімділігін тиімдірек арттыруды қамтамасыз етеді, ал наноалмаздарды өңдеу үшін қолданылатын аминсірке қышқылының концентрациясы неғұрлым жоғары болса, эпоксидті

наноккомпозиттің ыстыққа төзімділігі соғұрлым жоғары болады. Аминсірке қышқылының концентрациясын 2,5% - дан 7,5% - ға дейін арттыру құрамында 0,1м.ү. НА бар эпоксидті композицияның ыстыққа төзімділігін 142°C-тан 146-166°с-қа дейін арттыруды қамтамасыз етеді, (1-кесте).

Эпоксидті құрамға 0,01-ден 0,5 м.ү.-ке дейінгі мөлшерде таза AlN енгізу эпоксидті композиттің ыстыққа төзімділігін 110 ° С-тан 148-168 ° С-қа дейін арттырады. Сонымен қатар, AlN өңдеу үшін қолданылатын аминсірке қышқылының концентрациясы неғұрлым жоғары болса, эпоксидті наноккомпозиттің ыстыққа төзімділігі соғұрлым жоғары болады. Осылайша, аминсірке қышқылының концентрациясын 2,5% - дан 7,5% - ға дейін арттыру құрамында 0,05 м.ү. AlN бар эпоксидті композиттің ыстыққа төзімділігін 152 °С-тан 160-182 °С-қа дейін арттыруды қамтамасыз етеді (1-кесте).

Эпоксидті наноккомпозиттердің термиялық тұрақтылығы термогравиметриялық талдау әдісімен зерттелді. Алынған мәліметтер 2-кестеде келтірілген.

2-кесте. Эпоксидті наноккомпозиттерді термогравиметриялық зерттеу нәтижелері

Композит құрамы, м.ү., (15 м.ү. ПЭПА қатайтылған)	T5%, °C	T30%, °C	T50%, °C	T70%, °C	800 °C температурадағы қалдық, салмағы %
100ЭД-20 + 40ТХПФ	190	279	385	515	5.10
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0.10НА	205	284	394	525	3.70
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0,1НА (5.0% аминсірке қышқылы)	216	291	412	536	5.20
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0.05AlN	200	281	392	518	4.85
100ЭД-20 + 40ТХПФ + 0.05AlN (5.0% аминсірке қышқылы)	214	290	410	534	5.51

Ескерту: T_{5%}, T_{30%}, T_{50%} және T_{70%} сәйкесінше 5%, 30%, 50%, 70% масса жоғалту кезіндегі температуралар.

Алынған деректерді талдау көрсеткендей, аминсірке қышқылымен функционалданған наноалмаз бөлшектері мен алюминий нитридін

енгізу эпоксидті композиттің ыдырауының бастапқы температурасының жоғарылауын қамтамасыз етеді, бұл t5% индексінің сәйкесінше

190°C-тан 216°C-қа дейін және 190°C-тан 214°C-қа дейін жоғарылауымен расталады. Сонымен қатар, эпоксидті композитке аминсірке қышқылымен өңделген НА және AlN қосылуы эпоксидті нанокompозиттердің термиялық тұрақтылығын арттыратыны анықталды, бұл T30%, T50% және T70% жоғарылауымен расталады (2-кесте). НА және AlN енгізу 800°C температурада көміртегі қалдықтарының айтарлықтай өсуіне әкелмейтіні анықталды.

Қорытынды. Бұл зерттеу таза және модификацияланған нанотолтырғыштардың, атап айтқанда алюминий нитриді (AlN) мен наноалмаздардың (НА) эпоксидті композит құрылымының қалыптасу процестеріне айтарлықтай әсер ететінін және гельдену мен қатаю уақытын дәл реттеуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Нанобөлшектердің беттерін функционализациялау, әсіресе аминсірке қышқылымен (глицин) өңдеу, қатаю процестерінің тиімдірек басталуына ықпал етеді, бұл гельдену мен полимерлену уақытын қысқартады және жылулық әсерлерді арттырады. Дифференциалды сканерлеу калориметриясы (DSC) бойынша жүргізілген зерттеулер аминсірке қышқылымен функционалданған нанобөлшектерді эпоксидті матрицаға енгізу амин топтарының реакциялық қабілеттілігінің арқасында полимерлену процесін жеделдетіп қана қоймай, сонымен қатар полимерленудің жылулық әсерін күшейте отырып, қатаюдың бастапқы температурасын төмендететінін көрсетті.

Алынған эпоксидті композиттердің механикалық қасиеттері аминсірке қышқылымен өңделген наноалмаздар мен AlN қосу арқылы айтарлықтай жақсарады. Мысалы, таза наноалмаздары бар композиттермен салыстырғанда өңделген нано-

алмаздары бар композиттердің беріктігі 20%-ға, иілу кезіндегі серпімділік модулінің 14% - ға, созылу беріктігінің 19% - ға, созылу кезіндегі серпімділік модулінің 8% - ға және соққыға төзімділігінің 21% - ға артқанын көрсетеді. Сол сияқты, өңделген AlN бар композиттердің беріктігі 20% - ға, иілу кезіндегі серпімділік модулінің 14% - ға, созылу беріктігінің 13% - ға, созылу кезіндегі серпімділік модулінің 6% - ға және соққыға төзімділігінің 50% - ға артқанын көрсетеді.

Нәтижелер эпоксидті композиттердің жалпы сипаттамаларын жақсартудағы аминсірке қышқылымен өңдеудің маңызды ролін көрсетеді, өйткені өңделген нанотолтырғыштар өңделмеген нанотолтырғыштары барлармен салыстырғанда жоғары физикалық және механикалық қасиеттерге әкеледі. Сонымен қатар, нәтижелер таза немесе аминсірке қышқылымен модификацияланған НА және AlN нанобөлшектерінің қосылуы эпоксидті нанокompозиттердің ыстыққа төзімділігі мен термиялық тұрақтылығын айтарлықтай жақсартатынын көрсетеді, ал аминсірке қышқылдарының жоғары концентрациясы осы қасиеттердің одан әрі жақсаруына байланысты екенін көрсетеді. Тұтастай алғанда, бұл зерттеу эпоксидті композиттердің сипаттамаларын оңтайландырудағы функционалды нанотолтырғыштардың тиімділігін көрсетеді, бұл болашақ материалды әзірлеу үшін құнды ақпараттар береді.

Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант № BR18574094).

Әдебиеттер

1. Yu JH, Huo RM, Wu C, Wu XF, Wang GL, Jiang PK. Influence of interface structure on dielectric properties of epoxy/alumina nanocomposites // *Macromolecular Research*. 2012. – 20(8). – P. 816-826. DOI 10.1007/s13233-012-0122-2
2. Dagdag O., Safi Z., Hsissou R., Erramli H., El Bouchti M., Wazzan N., Guo L., Verma C., Ebenso E.E., El Harfi A. Epoxy pre-polymers as new and effective materials for corrosion inhibition of carbon steel in acidic medium: Computational and experimental studies // *Scientific Reports*. - 2019. - 9. - 11715. DOI 10.1038/s41598-019-48284-0

-
3. Piscitelli F., Scamardella, A.M., Romeo V., Lavorgna M., Barra G., Amendola E. Epoxy composites based on amino-silylated MMT: the role of interfaces and clay morphology // *Journal of Applied Polymer Science*. 2012. - Vol. 124. - P. 616 - 628. DOI 10.1002/app.35015
 4. Prasad K.E., Das B., Maitra U., Ramamurty U., Rao C.N.R. Extraordinary synergy in the mechanical properties of polymer matrix composites reinforced with 2 nanocarbons // *Proceeding of the National Academy Sciences*.- 2009.- Vol. 106.- P.13186–13189. DOI 10.1073/pnas.0905844106
 5. Solvent-free preparation of high-toughness epoxy-SWNT composite materials / J.M. González-Domínguez, A. Anson-Casaos, A.M. Díez-Pascual et al. // *ACS Appl Mater Interfaces*. - 2011. -Vol. 3(5). - P. 1441-1450. DOI 10.1021/am101260a
 6. Liang M., Wong K.L. Study of mechanical and thermal performances of epoxy resin filled with micro particles and nanoparticles // *Energy Procedia*. 2017. -Vol. 110. - P.156-161. DOI 10.1016/j.egypro.2017.03.121
 7. Bogdanova L.M., Lesnichaya V.A., Volkova N.N., Shershnev V.A., Irzhak V.I., Bukichev Yu.S., Dzhardimalieva G.I. Epoxy/TiO₂ composite materials and their mechanical properties // *Bulletin of the Karaganda University*. - 2020. -Vol. 99. - P.80-87. DOI10.31489/2020Ch3/80-87
 8. El-Aouni N., Hsissou R., El Azzaoui J., El Bouchti M., Elbachiri A., Elharfi A., Rafik M. One-pot Synthesis of Trifunctional Epoxy Resin and its Nanocomposite: Investigation of Thermal and Rheological Properties // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. - 2021. -Vol. 11(4). - P.12403-12413. DOI 10.33263/BRIAC114.1240312413
 9. Lian Z., Chen D. and Li Sh. Investigation on the Correlation between Dispersion Characteristics at Terahertz Range and Dielectric Permittivity at Low Frequency of Epoxy Resin Nanocomposites // *Polymers*. - 2022. -Vol. 14(4). DOI 10.3390/polym14040827
 10. Liang M., Wong K.L. Electrical performance of epoxy resin filled with micro particles and nanoparticles // *Energy Procedia*. 2016. - 110. - P.162-167. DOI 0.1016/j.egypro.2017.03.122
 11. Van C.D. Evaluation of an Epoxy-Based Nanosilicacomposite Lining in H₂SO₄ Solution for Anti-corrosion of Sewerage Concrete Structures // *Journal of Nanomaterials*. -2020. DOI 10.1155/2020/4090856
 12. Wang X., Zhang Q., Zhang X., Li Z., Parkin I.P., Zhang Z. Modifying Epoxy Resins to Resist Both Fire and Water // *Langmuir*.- 2019.-Vol. 35(44).- P.14332-14338. DOI 10.1021/acs.langmuir.9b02761
 13. Malekshahinezhad, K.; Ahmadi-khaneghah, A.; Behniafar, H. Amine-Functionalized TiO₂ Nanoparticles Covalently Loaded into Epoxy Networks via Thermal and Microwave Curing Processes // *Macromol. Res*. -2020. -Vol. 28. - P. 567 - 572. DOI 10.1007/s13233-020-8067-3
 14. Mozaffarinasab, H.; Jamshidi, M. Surface Modification of Carbon Nanotubes by a Bifunctional Amine Silane; Effects on Physical/Mechanical/Thermal Properties of Epoxy Nanocomposite // *Prog. Org. Coat*. - 2023. - Vol. 179. DOI 10.1016/j.porgcoat.2023.107521
 15. Yung T.Y., Lu Y.C., Chen J.S., Cheng Y.W., Liu T.Y., Chen P.T. Reinforcement of Epoxy Resin by Additives of Amine-Functionalized Graphene Nanosheets // *Coatings*. - 2021. -Vol. 11. DOI 10.3390/coatings11010035
 16. Zhang, D., Liu, F., Wang, S., Yan, M.; Hu, X., Xu, M. D-GQDs Modified Epoxy Resin Enhances the Thermal Conductivity of AlN/Epoxy Resin Thermally Conductive Composites // *Polymers*. - 2021. -Vol. 13. DOI 10.3390/polym13234074
 17. Lee Sanchez, W.A.; Li, J.-W.; Chiu, H.-T.; Cheng, C.-C.; Chiou, K.-C.; Lee, T.-M.; Chiu, C.-W. Highly Thermally Conductive Epoxy Composites with AlN/BN Hybrid Filler as Underfill Encapsulation Material

for Electronic Packaging // Polymers. -2022.-Vol.14 DOI 10.3390/polym14142950

18. Neitzel, I.; Mochalin, V.; Knoke, I.; Palmese, G.R.; Gogotsi, Y. Mechanical Properties of Epoxy Composites with High Contents of Nanodiamond // Compos. Sci. Technol. -2011. -Vol. 71.- P. 710- 716. DOI 10.1016/j.compscitech.2011.01.016
19. Schrand, A.M.; Hens, S.A.C.; Shenderova, O.A. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. -2009.-Vol. 34.-P. 18–74. DOI 10.1080/10408430902831987
20. Kim, S.-H.; Rhee, K.Y.; Park, S.-J. Amine-Terminated Chain-Grafted Nanodiamond/Epoxy Nanocomposites as Interfacial Materials: Thermal Conductivity and Fracture Resistance // Compos. Part B Eng. -2020. -Vol 192 (7755). DOI 10.1016/j.compositesb.2020.107983
21. Kalganova S., Arkhangel'skiy Yu., Lavrentyev V., Trigorly S., Artyukhov I., Stepanov S. Electro-technology of non-thermal modification of polymeric materials in a microwave electromagnetic field. // Electrotechnologies for Material Processing: material processing of XVIII International UIE-Congress, Hannover (Germany), June 6 - 9, 2017. 2017. С. 333-337.
22. Mostovoy, A.S., Nurtazina, A.S., Kadykova, Yu.A., Bekeshev, A.Z. Highly Efficient Plasticizers-Antipirenes for Epoxy Polymers // Inorganic Materials: Applied Research. -2019. -Vol 10(5). - P.1135-1139. DOI 10.1134/S2075113319050228
23. ISO 178: 2019; Plastics-Determination of Flexural Properties. ISO Committee: Geneva, Switzerland, 2019.
24. ISO 527-2:2012; Plastics-Determination of Tensile Properties-Part2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2012.
25. ISO 179-1:2010; Plastics-Determination of Charpy Impact Properties-Part 1: Non-Instrumented Impact Test. ISO: Geneva, Switzerland, 2010.
26. ISO 306: 2004; Plastics-Thermoplastic materials - Determination of Vicat softening temperature (VST). ISO: Geneva, Switzerland, 2004.
27. ISO 178:2010; Plastics - Determination of flexural properties. ISO: Geneva, Switzerland, 2010.
28. ISO 22007-2: 2015; Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
29. Mostovoj A.S. Oligooksipropilenglikol' - jeffektivnyj plastifikator dlja jepoksidnyh polimerov // Voprosy materialovedeniya. -2015. -№ 4 (84). -S. 117-122. [in Russian]

Авторлар туралы мәліметтер

Тастанова Л.К.- химия ғылымдарының кандидаты, профессор, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: lyazzatt@mail.ru;

Бекешев А.З.- физика-математика ғылымдарының кандидаты, профессор, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: amirbek2401@gmail.com;

Мостовой А.С.- техникалық ғылымдардың кандидаты, қауымдастырылған профессор, Функционалды материалдар мен жүйелерді зерттеудің заманауи әдістері зертханасы, Ю.Гагарин атындағы Саратов мемлекеттік техникалық университеті, Саратов, Ресей, e-mail: mostovoy19@rambler.ru;

Жұмабекова А.К. - химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ.Құлажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru;

Серікбаева Г.Д.- магистр, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, e-mail: serikbaeva.82.82@mail.ru

Information about the authors

Tastanova L.K.- candidate of chemical sciences, professor, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe,

Kazakhstan, e-mail: lyazzatt@mail.ru;

Bekeshev A.Z.- candidate of physical and mathematical sciences, professor, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: amirbek2401@gmail.com;

Mostovoy A.S.- candidate of technical sciences, associate professor, Laboratory of modern methods for the study of Functional Materials and systems, Saratov State Technical University named after Y. Gagarin, Saratov, Russia, e-mail: mostovoy19@rambler.ru;

Zhumabekova A.K.-candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, K. Kulazhanov Kazakh University of technology and business, Astana, Kazakhstan, e-mail: zhumabekova_ak@mail.ru;

Serikbaeva G. D.- Master, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan, e-mail: serikbaeva.82.82@mail.ru