



ХҒТАР 29.19.04

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-150-1-75-92>

Ғылыми мақала

АЖМПЭ негізіндегі композиттік жабындардың химиялық ортаға төзімділігі

М.К. Сқақов^{1,2}, М.Б. Баяндинова^{*2}, Е.А. Қожахметов³, Б.Т. Тұяқбаев²,
П. Жанимхан²

¹ «Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы», 071100, Қазақстан, Курчатов қ.

² «Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті», 070002, Қазақстан, Өскемен қ.

³ «Дәулет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті», 070004, Қазақстан, Өскемен қ.

*Хат алмасуға арналған автор: shohmanovamb@gmail.com

Аңдатпа. Бұл жұмыста диабаз түріндегі минералды толтырғышпен модификацияланған аса жоғары молекулалы полиэтилен (АЖМПЭ) негізіндегі композиттік жабындардың құрылымына қышқыл ортаның әсері зерттелген. 10% диабазды АЖМПЭ матрицасына енгізу композиттік жабынның коррозиялық ортаға төзімділігін едәуір арттыратыны анықталды, бұл таза АЖМПЭ және толтырғыш құрамы жоғары композиттермен салыстырғанда ісінудің минималды деңгейімен расталады.

Сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) жабын құрылымында диабазаның біркелкі таралуын және агломерация мен жарықтар сияқты ақаулардың жоқтығын көрсетті. Инфрақызыл спектроскопия (ИҚС) және рентгенқұрылымдық талдау әдістері қышқылдардың әсерінен жабындардың кристалдылық дәрежесінің төмендеуін анықтады, бірақ материалдардың химиялық құрылымында айтарлықтай өзгерістер тіркелмеген, бұл олардың химиялық деградацияға төзімділігін растайды.

Құрамында 10% дибаза бар композиттер ең жақсы химиялық төзімділікті көрсетті, бұл қышқылдардың диффузиясын болдырмайтын тосқауыл құрылымының қалыптасуымен байланысты. Алынған нәтижелер агрессивті орталарға төзімді жабындарды жасау үшін диабазды толтырғышпен АЖМПЭ қолдану перспективасын көрсетеді.

Түйінді сөздер: АЖМПЭ, дибаза, қышқыл орта, ИК-талдау, рентгенқұрылымдық талдау

Кіріспе

Коррозияға төзімділікті қоса алғанда, өнімділігі жақсартылған композиттік материалдарды әзірлеу және зерттеу қазіргі заманғы ғылым мен техниканың негізгі міндеттерінің бірі болып табылады. Осы тұрғыдағы перспективалы бағыттардың бірі қатты бейорганикалық толтырғыштармен модификацияланған полимерлі матрицаларды құру болып табылады. Мұндай композиттер жақсартылған механикалық қасиеттерді, тозуға төзімділікті және коррозиялық химиялық орталарға төзімділікті көрсетеді.

Аса жоғары молекулалы полиэтилен (АЖМПЭ) өзінің бірегей қасиеттеріне, соның ішінде төмен үйкеліс коэффициентіне, жоғары тозуға төзімділікке және химиялық инерттілікке [1-3] байланысты қорғаныс жабындарында, соның ішінде мұнай-газ және химия өнеркәсібінде қолданылатын көміртекті болаттарға арналған коррозияға қарсы жабындарда кеңінен қолданылады [4-6]. Алайда, нақты жұмыс жағдайында мұндай жабындар қоршаған ортаның агрессивті факторлардың әсерінен бұзылуға ұшырайды [7]. Бұл жақсартылған механикалық сипаттамалары және коррозияға төзімділігі жоғары материалдарды әзірлеуді қажет етеді.

Заманауи зерттеулерде талдаулар көрсеткендей, әртүрлі толтырғыштармен модификацияланған АЖМПЭ негізіндегі композиттерді коррозиялық ортада қолдану үшін айтарлықтай қызығушылық тудырады. Мысалы, зерттеу [8] тот баспайтын болаттан жасалған субстраттарда графен нанопарақтарымен (ГН) нығайтылған АЖМПЭ композиттерінің коррозияға төзімділігінің жоғарылағанын көрсетті. Толтырғышты 0,15–1 мас% концентрациясында қолдану коррозиялық әсерді айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік берді. Жұмыста [9] графенді нанокompозиттермен АЖМПЭ арматурасы тозу мен үйкелістің тиісінше 29% және 36% төмендеуін, сондай-ақ хлорид ерітінділерінің әсер ету жағдайында алюминий-магний қорытпаларының коррозияға төзімділігін арттыруды қамтамасыз ететіндігі көрсетілген. Бұл нәтижелер АЖМПЭ негізіндегі композиттердің функционалдық сипаттамаларын арттыру үшін толтырғыштарды қолданудың тиімділігін растайды.

Әдебиеттік талдау деректеріне сәйкес [1-9], АЖМПЭ өзінің керемет механикалық және химиялық қасиеттеріне байланысты ең перспективалы полимерлердің бірі болып табылады. Сонымен қатар, диабаз сияқты минералды толтырғыштарды қолдану композиттердің өнімділігін арттырудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. Диабаза табиғи минерал ретінде жоғары механикалық беріктікке, химиялық әсерге төзімділікке, қолжетімді бағаға және қоршаған ортаға зиянсыздығына ие [10]. Құрамында кремний, кальций, магний және алюминий оксидтері бар оның химиялық құрамы [11] материалдың коррозияға төзімділігі мен тозуға төзімділігін жақсартуға ықпал етеді.

Диабазды толтырғыш ретінде пайдалану перспективасына қарамастан, оның АЖМПЭ жабындарының құрылымы мен коррозиялық қасиеттеріне әсері әлі де толық қарастырылмаған. Бұл жұмыс осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған. Құрамында диабаза мөлшері әртүрлі АЖМПЭ композиттерінің микроқұрылымын және оларға қышқыл ортаның әсер етуі негізгі назарға алынды.

Бұл жұмыстың мақсаты диабаза түріндегі минералды толтырғышты қосу арқылы АЖМПЭ негізіндегі композиттің құрылымы мен қасиеттеріне қышқыл орталардың әсерін зерттеу болып табылады.

Алынған нәтижелер материалдардың коррозияға төзімділігіне жоғары талаптар қойылатын химия, мұнай-газ, кеме жасау және басқа салаларда қолдануға арналған композиттердің жаңа құрамдарын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Материалдар мен зерттеу әдістері

2.1 Материалдар және АЖМПЭ негізінде композитті алу әдісі

Жабындарды алу үшін негізгі материал ретінде АЖМПЭ коммерциялық ұнтағы (Yangzhou Guotai Fiberglass Co., Ltd.), тығыздығы 930 kg/m^3 , молекулалық салмағы $2 \cdot 10^6 \text{ моль}^{-1}$, $T_b = 135-150^\circ\text{C}$, сусымалы тығыздығы $>0,4 \text{ г/см}^3$ алынды. Толтырғыш ретінде – құрамында 10, 20, 30 және 40 мас. % дисперсті ұнтақ минералды диабаз қолданды. Диабаз бөлшектерінің орташа мөлшері 14 мкм болып табылады.

Жабындар газ-жалын әдісімен [12] сәйкесінше алынды. Субстрат ретінде стандартты алюминий фольга қолданылды. Кейінгі сынақтар мен зерттеулерді жүргізу үшін жабындар субстраттан механикалық түрде бөлінді. Алынған үлгілер төртбұрышты пішінді болады өлшемлер $50 \times 50 \times 1 \text{ мм}$.

2.2 Сынақтардың әдістері

2.2.1 Қышқыл ортаға төзімділік

Диабаз толтырғышы бар АЖМПЭ үлгісінің қышқылдық ортаға төзімділігі МЕМСТ 12020-2018 ұсынымдарына сәйкес зерттелді [13]. Зерттеу $23 \pm 1^\circ\text{C}$ бөлме температурасында жүргізілді. АЖМПЭ және диабаз толтырғыш үлгілерінің массасы "Crystal" аналитикалық таразыларында 0,0001 г дейін дәлдікпен өлшенді. Сынақ процесінде қышқылдардың әрқайсысы үшін 10% және 20% (H_2SO_4 және HCl) концентрациясы бар сынақ сұйықтығы қолданылды. Өлшенген үлгілер сыйымдылығы 500 см^3 болатын химиялық стакандарға орналастырылды, оған 200 см^3 сынақ сұйықтығы құйылды. Сынақ сұйықтығындағы үлгілерді ұстау уақыты-16 апта. Бақылау өлшемдері жеті күн аралықпен жүргізілді. Үлгілер ортадан алынып, ағынды сумен, содан кейін тазартылған сумен жуылып, сүзгі қағазымен немесе түксіз шүберекпен мұқият кептірілді. Сонымен қатар, апта сайын МЕМСТ 12020-2018 сәйкес [14] сынақ сұйықтығы бастапқы көлемге тең көлеммен ауыстырылды.

Қышқыл ортаға төзімділік (ісіну дәрежесі) келесі формула бойынша есептелді:

$$\alpha = \frac{m_i - m_0}{m_i} * 100 \quad (1)$$

бұндағы m_i – белгілі бір уақыт кезеңі ішінде ісінген масса, g ; m_0 – бастапқы масса, g .

2.3 Зерттеу әдістері

2.3.1 ИҚ-талдау

АЖМПЭ және оның негізіндегі композиттер және агрессивті орталардың әсерінен кейін стандартты әдіске сәйкес және әлсіреген толық шағылысуды өлшеуге арналған қосалқы жабдықты (ATR) пайдалана отырып, С. Аманжолов атындағы ШҚУ

зертханасында ажыратымдылығы 600-3500 см⁻¹ болатын Фурье түрлендіретін инфрақызыл спектрометрмен (FTIR-801 Simex) және айна-диффузды шағылысу (SDR) зерттелді [15].

2.3.2 Рентгенқұрылымдық талдау

Ұнтақтар мен композиттік полимердің рентгендік құрылымдық талдауы Xpert PRO PANalytical дифрактометрінде жүргізілді. Зерттеу барысында анодты мыс түтікке кернеу 40 кВ және ток 30 мА, $\text{Cu-K}\alpha$ сәулеленуі ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) берілді, түсіру қадамы 0,02°, санау уақыты 0,5 с/қадам болды. Алынған дифрактограмма сызықтары бойынша фазалық талдау HighScore Plus бағдарламалық кешендерінің көмегімен жүргізілді. Үлгілерді дайындау, түсіру режимдерін таңдау және дифрактограммаларды есептеу [16-17] жұмыста көрсетілген әдістерге сәйкес жүргізілді.

Кристалдық дәрежесі (χ) РФ талдау [18] жұмыста сипатталған әдіспен анықталды, 2θ дифракция бұрыштарының диапазоны 10-600, ол полимердегі кристалдық және аморфты фазалардың қатынасын сипаттайды және келесі формула бойынша анықталады:

$$\chi(\%) = \frac{S_c}{S_c + S_a} \times 100\% \quad (2)$$

бұндағы S_c – кристалдық бөліктің ауданы (гало үстінде); S_a – аморфты бөліктің ауданы (гало астында).

2.3.3 СЭМ-талдау

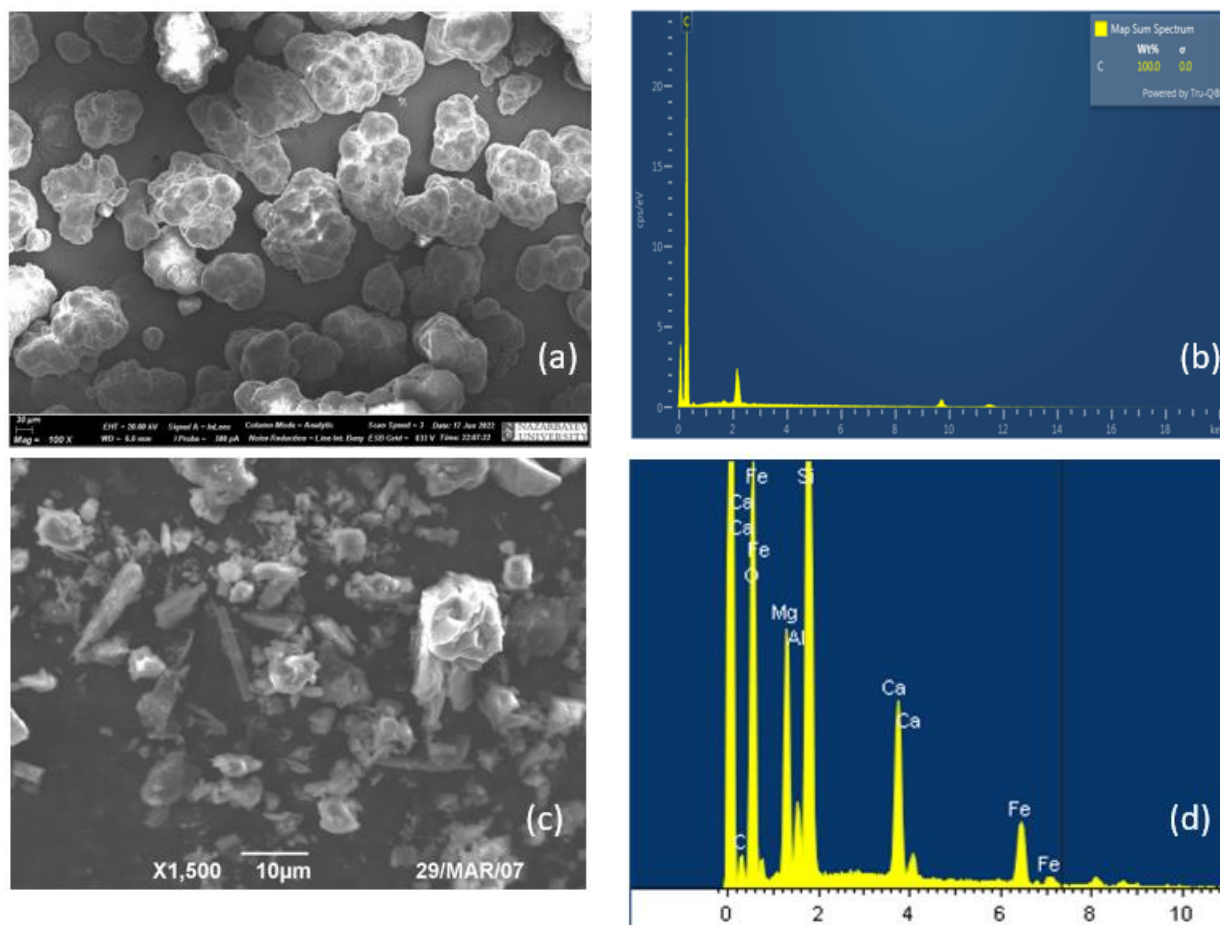
Агрессиялық ортаға дейін және одан кейін АЖМПЭ және диабаз толтырғыш микроқұрылымы INCA Energy Энерго-дисперсиялық микроанализ жүйесімен Crossbeam XB 540 (Carl Zeiss, Германия) сканерлеуші электронды микроскопия әдісімен зерттелді. Үлгі беті мен линзаның төменгі бөлігі арасындағы жұмыс қашықтығы 4,7 мм болды, бұл 20 кВ кернеуді жеделдетеді.

Нәтижелер және оларды талқылау

3.1 Ұнтақтарды СЭМ – талдау

Бастапқы АЖМПЭ морфологиясы суретте көрсетілгендей ақ ұнтақ болып табылады. 1а, бөлшектердің орташа мөлшері 150 мкм және сфералық пішінді. Күтілетін энергия дисперсиясын талдауда тек көміртегі спектрі бар.

Диабаз ұнтағы (1с суретті қараңыз) ламелла, ине және сфералық құрылымды бөлшектермен аралас, ұнтақтың орташа мөлшері 14 мкм. СЭМ қолдану арқылы ЭҚК талдау нәтижелері 1d келтірілген, диабаза ұнтақтары құрамында (%) келесі химиялық белсенді элементтер бар: Si – 24.06, O 41.40, Fe – 13.61, Ca – 10.82, Mg – 8.03, Al – 2.08.

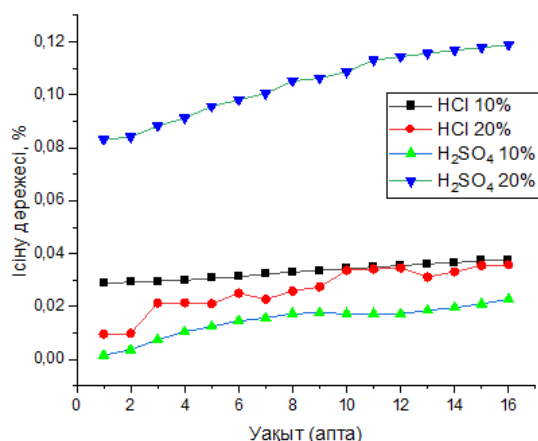


1-сурет. СЭМ-элементтік талдаулары бар ұнтақтардың суреттері: (а) және (b) АЖМПЭ, (с) және (d) диабаз

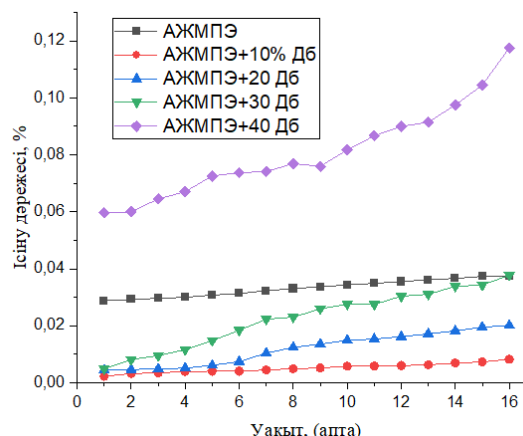
3.2 Қышқыл ортадағы композиттік үлгілердің тұрақтылығын анықтау нәтижелері

2а-суретте АЖМПЭ үлгілері ұзақ уақыт бойы қышқылдарға (H_2SO және HCl) ұшыраған кезде химиялық төзімділік нәтижелер көрсетілген. Алайда, үлгілердің ісіну дәрежесі мен массасының өзгеруі қышқылдардың мөлшері мен олардың әсер ету ұзақтығының жоғарылауымен артады, бұл полимер құрамындағы қышқыл молекулаларының диффузиясына және материалдың ішінара деградациясына әкеледі.

АЖМПЭ үлгілерінің ісінуі ұзақ сынақтар кезінде сақтау үшін маңызды. Алғашқы бірнеше аптадан кейін массаның өзгеруі азаяды, бұл полимер құрылымының қышқылдармен қанықтылығын көрсетеді. Бұл АЖМПЭ үлгілері орташа агрессивті ортада өздерінің негізгі сипаттамаларын сақтай алатындығын көрсетеді. АЖМПЭ үлгілері құрамында қышқылдың орташа концентрациясы бар және төмен ортада қолдану үшін жеткілікті химиялық төзімділікке ие, бұл оларды орташа химиялық әсер ету жағдайында пайдалану үшін перспективті етеді.



а)



б)

2-сурет. Жабын тұрақтылығының уақытша тәуелділігі: а) қышқыл ортадағы АЖМПЭ жабыны, б) тұз қышқылындағы диабаздың әр түрлі пайыздық құрамы бар АЖМПЭ композиттік жабыны

2б-суреттен диабаз қосылған АЖМПЭ композициялық жабындары таза АЖМПЭ жабындарымен салыстырғанда тұз қышқылында химиялық төзімділіктің жоғарылағанын көрсетеді. Толтырғышты қосу қышқыл молекулаларының енуіне жол бермейтін тосқауыл құрылымын құру арқылы жабынның ісіну дәрежесін төмендетеді. Алайда, толтырғыш құрамының жоғарылауымен химиялық төзімділіктің нашарлауы байқалады, бұл полимер матрицасының тұтастығының бұзылуымен байланысты.

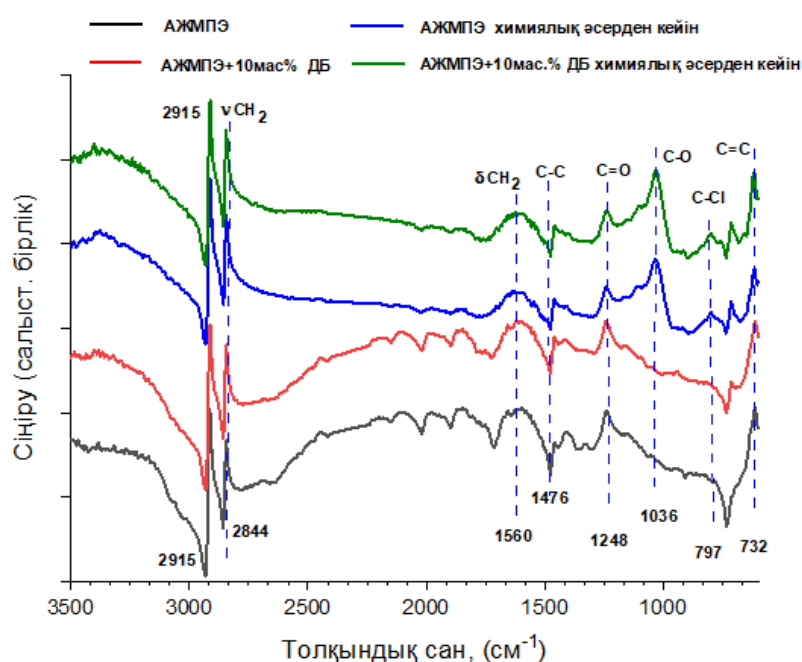
Диабаздың 10% деңгейінде жабын ең жақсы төзімділікті көрсетеді (ісіну дәрежесі 0,00598 г), бұл толтырғыштың біркелкі таралуына және тосқауыл қасиеттерінің жоғарылауына байланысты. Диабаздың 20%-ға дейін жоғарылауымен жабынның химиялық төзімділігі жоғары болып қалады, алайда матрицадағы молекулааралық байланыстардың бастапқы бұзылуына байланысты ісіну деңгейі 0,01564 г дейін артады. 30% және 40% қант диабазында химиялық төзімділік күрт төмендейді (ісіну деңгейі сәйкесінше 0,0329 г және 0,058 г құрайды). Бұл жабын құрылымында ақаулар тудыратын, кеуектілікті арттыратын және қышқылдың тереңірек енуіне мүмкіндік беретін толтырғыштың артық мөлшеріне байланысты.

Диабаз инертті бейорганикалық материал бола отырып, аз мөлшерде (10-20%) қышқылдың енуін қиындататын физикалық тосқауыл жасау арқылы жабынның химиялық төзімділігін арттырады. Жоғары мөлшерде (30-40%) диабаз полимер матрицасын бұзады, бұл жабынның ісінуінің жоғарылауына және қышқылдың әсеріне төзімділіктің төмендеуіне әкеледі.

Графикте төмен диабазды жабындар (10% және 20%) 16 апталық сынақтарда тұрақты ісіну көрсеткіштерін сақтайтынын көрсетеді, бұл олардың ұзақ мерзімді химиялық төзімділігін көрсетеді. Осылайша, құрамында 10-20% шегінде диабазы бар АЖМПЭ жабындары орташа агрессивті орта жағдайында сәтті қолданылуы мүмкін.

3.3 ИҚ талдау нәтижелері

3-суретте ИҚ-спектроскопия әдісімен АЖМПЭ негізіндегі композициялық жабындардың бетін зерттеу нәтижелері келтірілген. ИҚ спектрлерінде 2915 см^{-1} , 2844 см^{-1} кезіндегі С-Н топтарының деформациялық тербелістері және 1560 см^{-1} кезіндегі С-Н тобының валенттік тербелістері көрінеді [19]. Сондай-ақ, карбонилді функционалды топтарды 1248 см^{-1} -де байқауға болады, ал 721 см^{-1} шыңы С=С қос байланысын көрсетеді, жоғарыда көрсетілген жолақтар жұмыста көрсетілгендей бастапқы АЖМПЭ сіңіру жолақтарына тән [20].



3-сурет. Таза АЖМПЭ алынған және 10 пайыздық диабаз толтырғышы бар үлгілердің ИҚ-спектрлері: қышқыл ортаға әсер еткенге дейін және одан кейін

1476 см^{-1} белгіленген сіңіру жолағы АЖМПЭ құрылымын сипаттайтын С-С байланыстарының жұтылу шыңы болып табылады. 1248 см^{-1} диапазонында орналасқан жұтылу шыңдары [21] сәйкес С = О топтарының валенттік тербелістерін көрсете алады.

Химиялық өңдеуден кейін спектрде 1036 см^{-1} сіңіру жолағының пайда болуы С-О тобына (карбонил тобы) тән байланыстардың пайда болуымен байланысты. Бұл жолақ материалдың беткі қабатының (АЖМПЭ) өңдеу процесінде қолданылатын реагенттермен өзара әрекеттесуі нәтижесінде пайда болады, нәтижесінде С-О байланысы бар функционалды топтар пайда болады. С-Cl байланыстарына сәйкес келетін 797 см^{-1} шыңының пайда болуы АЖМПЭ мен хлор бар орта арасындағы реакцияның салдары болуы мүмкін, ол үлгіні HCl ерітіндісімен химиялық өңдеу спектрден кейін пайда болады.

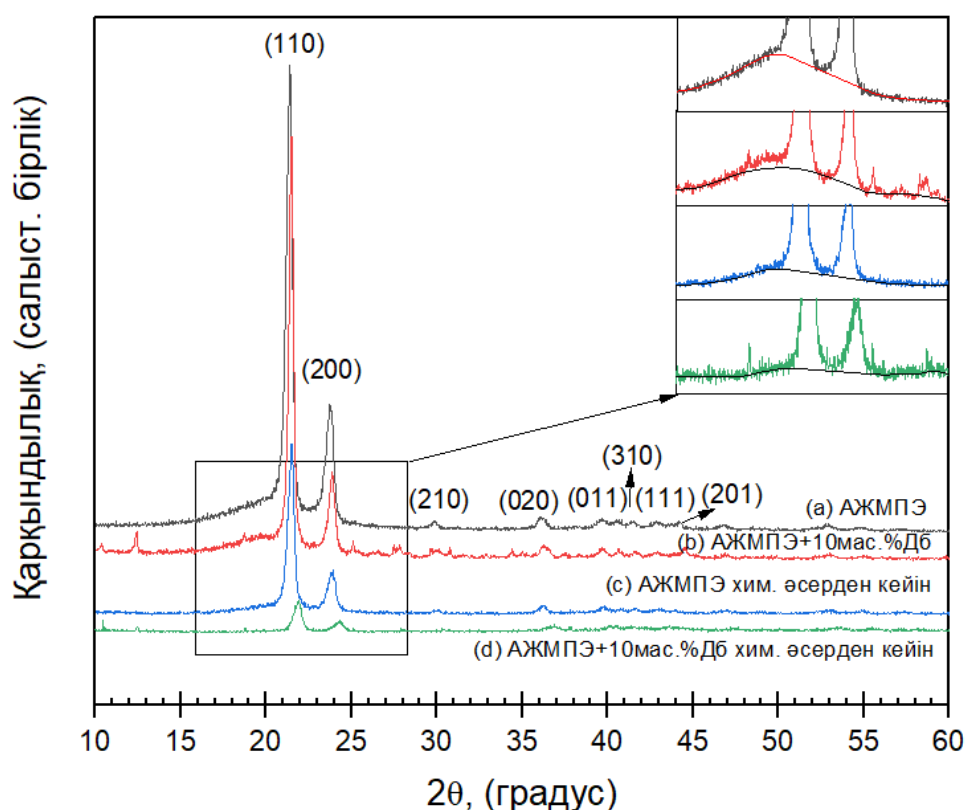
АЖМПЭ үлгілері мен оның негізіндегі композиттердің алынған ИҚ-спектрлеріне сәйкес, химиялық әсерден кейін агрессивті ортада спектрлерде шамалы өзгерістер болады деген қорытынды жасауға болады. Алайда, үлгілердің құрамдас бөліктері арасындағы негізгі байланыс өзгеріссіз қалды, бұл негізгі шыңдардың орын ауыстыруының

болмауына байланысты. Бұл АЖМПЭ және оның негізіндегі композиттер агрессивті ортаның әсерінен айтарлықтай деградацияға ұшырамағанын көрсетеді.

3.4 Рентгенқұрылымдық талдау нәтижелері

4 суретте құрамында 10 мас.% бар диабаз толтырғышы бар таза АЖМПЭ және АЖМПЭ композит үлгілерінің қышқыл ортамен әрекеттескенге дейін және одан кейінгі рентгендік дифракциялық үлгісі келтірілген. Рентгенограммада екі қарқынды рефлекс (110) $2\theta = 21,76^\circ$ және (200) $24,15^\circ$ байқалады олар АЖМПЭ құрылымының орторомбиялық торға ие [22] кристалды бөлігін сипаттайды. Күрделі химиялық құрамына байланысты диабаз шыңдары төмен қарқындылыққа ие. Диабаздың ең қарқынды рефлекстері (004), (420) және (111) сәйкесінше $12,49^\circ$, $25,11^\circ$ және $27,91^\circ$ дифракция бұрыштарында байқалады.

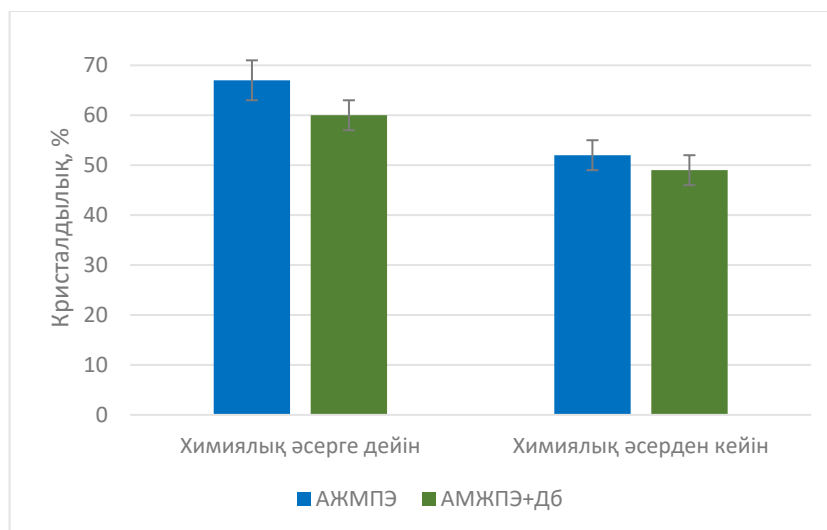
Химиялық әсерден кейін үлгілердің дифракциялық сызықтарының қарқындылығы біршама төмендейтіні байқалады.



4-сурет. Таза АЖМПЭ және құрамында 10 мас. % бар диабаз толтырғышы бар АЖМПЭ композиті үлгілерінің бастапқы күйінде және қышқыл ортаға ұшырағаннан кейінгі рентгендік талдау

Рентгенодифракциялық деректерді талдаудан химиялық әсерге дейінгі (5-суретке қараңыз), таза АЖМПЭ үлгісінің кристалдылық дәрежесі 67% құрайтыны анықталды, ал АЖМПЭ негізіндегі композит үшін 10 мас.% мөлшерінде диабаз толтырғышын кристалдылық дәрежесі 60% құрайды. Химиялық әсерден кейін АЖМПЭ және оның

негізіндегі композиттен алынған үлгілердің кристалдылық пайызы төмендейді және сәйкесінше 52 және 49% құрайды. Қышқылдар АЖМПЭ бетінде иондардың тұндырылуын тудыруы мүмкін, бұл материалдың кристалдылық дәрежесін төмендететін беткі қабықшалардың немесе шөгінділердің пайда болуына әкелуі мүмкін. [23,24] белгілі болғандай, радиациялық-химиялық әсерлердің нәтижесінде полимердің кристалдық дәрежесі айтарлықтай төмендеуі мүмкін.



5-сурет. Құрамында 10 мас. % диабаз толтырғышы бар таза АӨСШК және АӨСШК композит үлгілерінің бастапқы күйінде және қышқыл ортаға ұшырағаннан кейінгі кристалдылығы

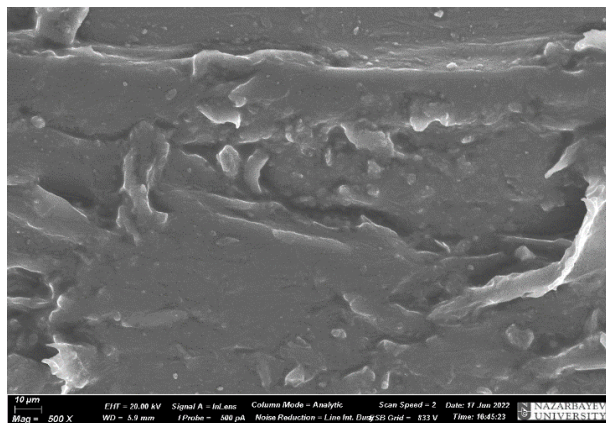
3.5 СЭМ-талдау нәтижелері

АЖМПЭ және құрамында 10 мас.% диабаз бар композиттік үлгілердің бастапқы күйінде және агрессивті ортаға ұшырағаннан кейін морфологиялық айырмашылықтар СЭМ суреттерінде көрсетілген (6 а, б - сурет). Көріп отырғанымыздай, құрамы 10 мас. % болатын композициялық үлгілер үшін диабаза толтырғыш бөлшектерінің агломерациясының белгілері жоқ. Диабаз бөлшектері АЖМПЭ матрицасында біркелкі бөлінеді, оның құрылымына толығымен біріктірілген және үлгілерде сенімді ұсталады. Бұл морфологиялық ерекшеліктер химиялық әсерлерге төзімді берік құрылымның қалыптасуына ықпал ететін толтырғыш пен полимер матрицасы арасындағы өзара әрекеттесудің жоғары деңгейін көрсетеді.

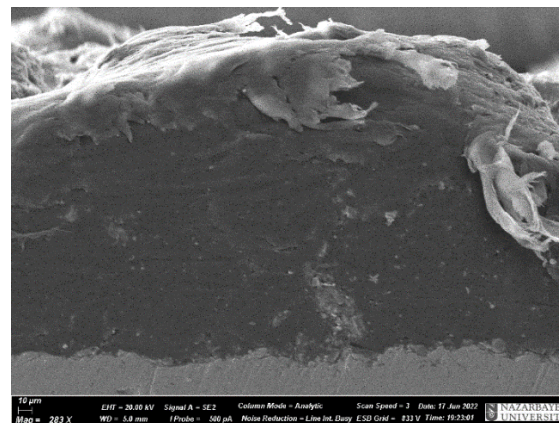
Диабаза бөлшектері жарықтар мен ақаулардың пайда болу орталығы емес екенін ескеру маңызды. 6 с, d – суреттерде композит компоненттері арасындағы жақсы адгезияны көрсетеді, бұл агрессивті ортада үлгілердің беріктігін арттыруда шешуші рөл атқарады.

Диабаз толтырғышы бар АЖМПЭ үлгілерінің бетінде агрессивті орта әсер еткеннен кейін шамалы өзгерістер байқалады. Полимер матрицасының үздіксіз құрылымы сақталады, бұл оның морфологиялық тұрақтылығын растайды. Құрылымның сақталуын химиялық инерттілікпен және агрессивті агенттердің диффузиясына кедергі келтіретін

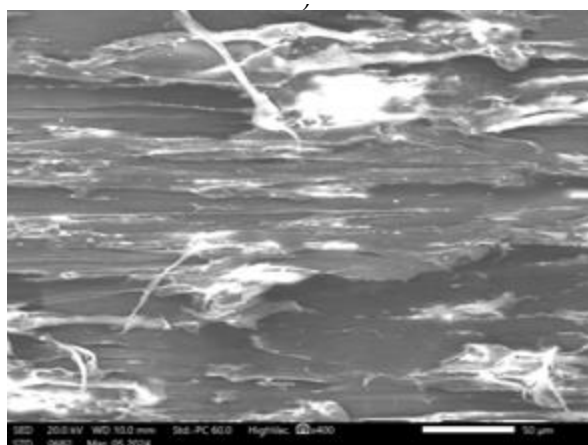
АЖМПЭ жоғары молекулалық салмағымен түсіндіруге болады. Бұл нәтижелер әдебиетте келтірілген мәліметтерге сәйкес келеді [25], онда АЖМПЭ-нің химиялық деградацияға жоғары төзімділігі көрсетілген.



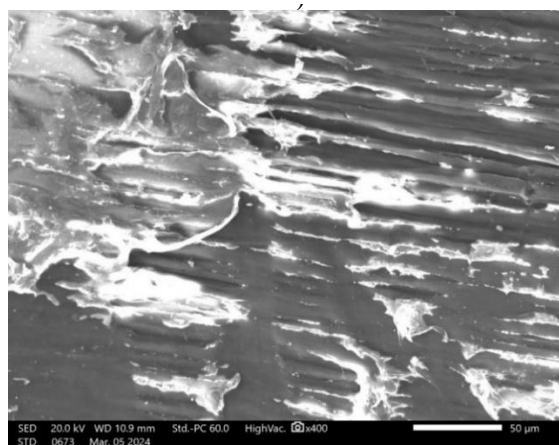
a)



b)



c)



d)

6-сурет. СЭМ – суреттері: бастапқы күй үлгілерінің (а) АЖМПЭ және (б) АЖМПЭ 10мас.% диабаз-толтырғышпен және қышқыл ортаның әсерінен кейінгі (с) АЖМПЭ және (д) АЖМПЭ 10мас.% диабаз-толтырғыш морфологиясы

Рентгендік құрылымдық талдау (XRD) және инфрақызыл спектроскопия (ИК) нәтижелері қышқылдық ортаға әсер еткеннен кейін композиттің кристалдық дәрежесі мен химиялық құрылымында минималды өзгерістерді көрсетті. Бұл материалдың молекулалық ұйымында айтарлықтай өзгерістердің жоқтығын көрсетеді, бұл оның химиялық төзімділігін тағы бір рет көрсетеді.

Тығыздығы жоғары полиэтилен (HDPE) немесе полипропилен (PP) сияқты басқа полимерлерге негізделген ұқсас материалдармен салыстырмалы талдау АЖМПЭ үлгілері тозуға төзімділігі жоғары және реактивтілігі төмен болғандықтан қышқылға төзімділігі бойынша олардан асып түсетінін көрсетеді. Мысалы, полипропилен (ПП)

композиттеріне бағытталған зерттеулерде қышқылдық ортаның екі апталық әсерінен кейін микрокректердің пайда болуы және механикалық өнімділіктің төмендеуі байқалды [26,27].

Сонымен қатар, композиттің қасиеттеріне толтырғыштың мөлшері мен концентрациясының әсерін ажыратуға болады. [28,29] сәйкес толтырғыш бөлшектерінің мөлшерін нанометрлік диапазонға дейін азайту немесе олардың құрамын 15%-ға дейін арттыру үлгінің тығыздығы мен беріктігін арттыруы мүмкін. Алайда, толтырғыштың артық мөлшері агломерацияға әкеледі, бұл материалдың біркелкілігін төмендетеді және жарықтар пайда болу ықтималдығын арттырады.

АЖМПЭ-нің агрессивті ортаға жоғары төзімділігі оны химия, мұнай-газ, кеме жасау және басқа салаларда қолдану үшін тамаша таңдау жасайды. Диабазы бар композиттер экстремалды жағдайларда жұмыс істейтін коррозияға қарсы жабындарды жасауға уәде береді.

Қорытынды

Осылайша, бірқатар эксперименттік әдістердің көмегімен қышқыл ортаның АЖМПЭ микроқұрылымына және оның негізінде диабаз түріндегі минералды толтырғышпен композициялық үлгілерге әсері зерттелді. Құрамында 10 диабазы бар таза АЖМПЭ және АЖМПЭ композит үлгілері қышқыл ортаға ең жақсы төзімділікке ие екендігі анықталды. Нәтижелер АЖМПЭ және оның негізіндегі композиттер агрессивті ортаның әсерінен ыдырамайтынын көрсетеді және зерттелетін материалдың қышқылдарға төмен реактивтілігін көрсетеді. Алайда, диабаздың жоғарылауымен АЖМПЭ композит қышқылдық ортаның әсеріне төзімділігі біршама төмендейді. Бұл композиттегі АЖМПЭ матрицалық материалының үлесінің төмендеуіне байланысты сияқты.

Сондай-ақ, агрессивті ортаға ұшырағаннан кейін таза АЖМПЭ кристалдылығы 67-ден 52%-ға дейін, ал 10% диабаз толтырғышы бар АЖМПЭ композиті үшін 60-тан 49%-ға дейін төмендейтіні анықталды. АЖМПЭ үлгілері мен оның негізіндегі композиттердің ИҚ-спектроскопиясы агрессивті ортаның химиялық әсерінен негізгі шыңдардың елеулі өзгерістерін немесе ығысуларын анықтаған жоқ. Бұл АЖМПЭ және оның негізіндегі композиттер химиялық ортаның әсерінен айтарлықтай деградацияға ұшырамағанын көрсетеді. Үлгі бетінде көрінетін ақаулардың болмауы сонымен қатар композициялық материалдың микроқұрылымы қышқыл ортаға ұшыраған кезде айтарлықтай химиялық деградацияға немесе коррозияға ұшырамайтынын көрсетеді. Біздің ойымызша, жоғары орташа төзімділіктің арқасында АЖМПЭ және оның диабазды толтырғыш композиттеріндегі құрылымдық өзгерістер басқа полимерлерге қарағанда аз дәрежеде орын алады, бұл оны агрессивті ортада қолдануға тартымды етеді.

Авторлардың қосқан үлесі;

М.К. Сқақов – концептуализация, басқару

М.Б. Баяндинова – жазу – бастапқы жобаны дайындау, рецензиялау және редакциялау

Е.А. Қожахметов – жоба әкімшілігі

Б.Т. Тұяқбаев – әдістеме

П. Жанимхан – зерттеу

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

Бұл зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті АР №19679461 гранттық жобасы аясында жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі

1. M.Abdul Samad, *Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/ UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review*, *Polymers* 2021, 13, 608, <https://doi.org/10.3390/polym13040608> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
2. J.C. Baena, J. Wu, Z.Peng, *Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications: A Review*, *Lubricants* 2015, 3, 413-436, <https://doi.org/10.3390/lubricants3020413> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
3. P. Bracco, A. Bellare, A. Bistolfi, S. Affatato, *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Influence of the Chemical, Physical and Mechanical Properties on the Wear Behavior. A Review*, *Materials* 2017, 10, 791, <https://doi.org/10.3390/ma10070791> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
4. W. Pang, Z. Ni, J. Wu, Y. Zhao, *Investigation of tribological properties of graphene oxide reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene under artificial seawater lubricating condition*, *Applied Surface Science*, 2018. Volume 434, pp. 273-282, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.115> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
5. T.Z.K. Armenovich, Z.A. Dmitrievich, *Short Overview of Practical Application and Further Prospects of Materials Based on Crosslinked Polyethylene*, *Springer*, Singapore, 2021. pp 349-377, https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_12 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
6. M.S. Darvish, *Behaviour of UHMWPE material in water supply systems with consideration of water quality*, *Journal of Piping Systems Engineering and Practice*, - 2021. - Vol. 12. - №. 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000612) – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
7. R.J. Varley, K.H. Leong, *In Polymeric Coatings for Oil Field Pipelines*, *Hughes AE, Mol JMC, Zheludkevich ML, Buchheit RG, Eds., Act. Prot. Coatings*, *Springer*: New York, 2016, pp. 385-428 – ағылшын тіліндегі кітап
8. J. Han, S. Ding, W. Zheng, W. Li, H. Li, *Microstructure and anti-wear and corrosion performances of novel HMWPE/grapheme-nanosheet composite coatings deposited by flame spraying*, *Polymers advanced technologies*, 2013, Online Library, <https://doi:10.1002/pat.3161> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
9. I.K. Aliyu, A.S. Mohammed, *Wear and corrosion resistance performance of UHMWPE /GNPs nanocomposite coatings on AA2028 Al alloys*, *Progress in Organic Coatings*, - 2021, 151, 106072, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106072> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
10. K.N. Paffenholtz, *Diabase. Geological Dictionary: In 2 Volumes*, Nedra. 1978, available online: <https://www.geolib.net/petrography/diabaz.html> – ағылшын тіліндегі кітап
11. M. Skakov, M. Bayandinova, I. Ocheredko, B. Tuyakbayev, M. Nurizinova, A. Gradoboev, *Influence of diabase Filler on the Structure and Tribological Properties of Coatings Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene*, *Polymers* 2023, 15, 3465, <https://doi.org/10.3390/polym15163465> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

12. M.K. Skakov, I.A. Ocheredko, M.B. Bayandinova, B.T. Tuyakbaev, *The impact of technological parameters of the torch to physical and chemical properties of a gas-thermal burner for spraying ultra-high molecular weight polyethylene*, Physical Sciences and Technology, 2022, Vol. 9, pp. 59-68, <https://doi.org/10.26577/phst.2022.v9.i2.08> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
13. М.Скаков, И.А. Очередько, Б.Т. Туякбаев, М.Б. Баяндинова, *Порошковый материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для газотермического напыления полимерных покрытий. Порошковый материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для газотермического напыления полимерных покрытий*, Патент № 8197. С 23.06.2023 – патент
14. ГОСТ 12020-2018 (ISO 175:2010) ISO 175:2010, *Пластмассы - Методы испытаний для определения воздействия погружения в жидкие химические вещества*, MOD, Москва Стандартиформ. 2018 – заңнамалық және нормативтік құжаттар
15. М. Скаков, Н. Кантаи, М. Нуризинова, Б. Туякбаев, М. Баяндинова, *Влияние порошков оксида кремния и диоксида титана на степень кристаллизации и химическую структуру полимерного (СВМПЭ) покрытия, полученного методом газотермического напыления*, Научный журнал «Доклады Национальной академии наук РК», - 2022. - №. 4. - С. 153-163, – орыс тіліндегі журнал мақаласы
16. B. Rakhadilov, N. Muktanova, D. Kakimzhanov, M. Adilkanova, S. Kurbanbekov, S. Abdulina, *Influence of Varying the Spraying Distance on the Structural-Phase State and Mechanotribological Properties of 86WC-10Co-4Cr-Based Coatings Obtained by the HVOF Method*, Coatings, 14(3), 264, <https://doi.org/10.3390/coatings14030264> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
17. B. Rakhadilov, M. Bayandinova, R. Kussainov, A. Maulit, *Electrolyte-plasma surface hardening of hollow steel applicator needles for point injection of liquid mineral fertilizers*, AIMS Materials Science, 11(2): 295-308. DOI: 10.3934/matrics.2024016 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
18. Е.В. Тудрий, И.В. Галкина, *Физико-химия полимеров*, Казань, 2015. - 45 стр – орыс тіліндегі кітап
19. M.R. Sanchis, V. Blanes, M. Blanes, D. Garcia, R. Balart, *Surface modification of low density polyethylene (LDPE) film by low pressure O₂ plasma treatment*, Eur. Polym. J. 2006, 42, pp. 1558-1568. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.02.001> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
20. S.Q. Ye, F. He, J. Chen, H. Yang, X.Q. Liu, J.L. Xie, *Effect of Al/Si on Structure and Properties of SiO₂-Al₂O₃-MgO Glass*, J. Wuhan Univ. Technol, 2017, 36, pp. 22-25 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
21. S.N. Danilova, V. Liansai, C. Yang, *Development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE*, Metallurgy and Materials Science. 2020. 25(3) DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-25-3-X – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
22. M. Skakov, I. Ocheredko, B. Tuyakbayev, M. Bayandinova, M. Nurizina, *Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene*, Coatings 2023, 13, <https://doi.org/10.3390/coatings13040698> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы
23. В.А. Каргин, *Синтез и химические превращения полимеров*, - М.: Наука, 1981.- 393 стр – орыс тіліндегі кітап
24. D. Manas, M. Ovsik, A. Mizera, M. Manas, L. Hylova, M. Bednarik, M. Stanek, *The Effect of Irradiation on Mechanical and Thermal Properties of Selected Types of Polymers*, Polymers 2018, 10, 158, <https://doi.org/10.3390/polym10020158> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

25. S. Jose, J. Parameswaranpillai, B. Francis, A.S. Aprem, S. Thomas, *Thermal degradation and crystallization characteristics of multiphase polymer systems with and without compatibilizer*, *AIMS Materials Science*, – 2016, 3, - б. 1177-1198, <https://DOI:10.3934/mat.2016.3.1177> – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

26. S.H. Jafari, M.A. Javadpour, H. Zebarjad, R.A.H. Derakhshandeh, *Effect of Acidic and Alkaline Solutions on the Mechanical Properties of Polypropylene Composites*, *Journal of Polymer Research*, vol. 18, no. 4, 2011, pp. 489-498 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

27. R. Smith, J. Taylor, *Chemical resistance and mechanical properties of polypropylene composites under acidic environments*, *Journal of Polymer Science*, 59(4), 456-468. DOI: 10.xxxx/jps.2021.456 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

28. Y. Chen, X. Li, L. Wu, *Impact of Filler Particle Size and Content on Mechanical Properties of Polymer Composites*, *Composite Science and Technology*, vol. 72, no. 5, 2012, pp. 548-555 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

29. Y. Zhao, W. Li, *Effects of nanoparticle size and loading concentration on the properties of polymer-based composites*, *Advanced Materials Science and Engineering*, 34(2), 123-134. DOI: 10.xxxx/amse.2020.123 – ағылшын тіліндегі журнал мақаласы

М.К. Скаков^{1,2}, М.Б. Баяндинова^{*2}, Е.А. Қожахметов³, Б.Т. Туяқбаев², П. Жанимхан²

¹ «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», 071100,

Казахстан, г. Курчатов

² «Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова», 070002,

Казахстан, г. Усть-Каменогорск

³ «Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева», 070004,

Казахстан, г. Усть-Каменогорск

*Автор для корреспонденции: shohmanovamb@gmail.com

Химическая стойкость композитных покрытий на основе СВМПЭ

Аннотация. В данной работе исследовано влияние кислой среды на структуру композитных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного минеральным наполнителем в виде диабаза. Установлено, что введение 10 мас.% диабаза в матрицу сверхвысокомолекулярного полиэтилена значительно повышает устойчивость композитного покрытия к коррозионной среде, что подтверждается минимальным уровнем набухания по сравнению с чистым сверхвысокомолекулярным полиэтиленом и композитами с более высоким содержанием наполнителя.

Сканирующая электронная микроскопия показала равномерное распределение диабаза в структуре покрытия и отсутствие дефектов, таких как агломерация и трещины. Методами инфракрасной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа установлено снижение степени кристалличности покрытий под воздействием кислот, однако значительных изменений в их химической структуре не зафиксировано, что подтверждает устойчивость материалов к химической деградации.

Композиты, содержащие 10 мас.% диабаз, продемонстрировали наилучшую химическую стойкость, что связано с формированием барьерной структуры, препятствующей диффузии кислот. Полученные результаты подтверждают перспективность использования сверхвысокомолекулярного полиэтилена с дибазовым наполнителем для создания покрытий, устойчивых к агрессивным средам.

Ключевые слова: СВМПЭ, диабаз, кислотная среда, ИК-анализ, рентгеноструктурный анализ

M.K. Skakov^{1,2}, M.B. Bayandinova^{*2}, E.A. Kozhakhmetov³, B.T. Tuyakbaev², P. Zhanimkhan²

¹«National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan», 071100, Kazakhstan, Kurchatov.

²«Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University», 070002, Kazakhstan,
Ust-kamenogorsk.

³«Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University», 070004, Kazakhstan, Ust-kamenogorsk.

*Correspondence: shohmanovamb@gmail.com

Chemical resistance of composite coatings based on UHMWPE

Abstract. This study investigates the effect of an acidic environment on the structure of composite coatings based on ultrahigh molecular weight polyethylene modified with a mineral filler in the form of diabase. It has been established that the introduction of 10 wt.% diabase into the ultrahigh molecular weight polyethylene matrix significantly enhances the composite coating's resistance to a corrosive environment, as evidenced by the minimal swelling level compared to pure ultrahigh molecular weight polyethylene and composites with a higher filler content.

Scanning electron microscopy revealed a uniform distribution of diabase within the coating structure and the absence of defects such as agglomeration and cracks. Infrared spectroscopy and X-ray diffraction analysis demonstrated a decrease in the crystallinity of the coatings under acid exposure; however, no significant changes in their chemical structure were detected, confirming the materials' resistance to chemical degradation.

Composites containing 10 wt.% diabase demonstrated the best chemical resistance, which is attributed to the formation of a barrier structure that prevents acid diffusion. The obtained results confirm the feasibility of using ultrahigh molecular weight polyethylene with a diabase filler for the development of coatings resistant to aggressive environments.

Keywords: UHMWPE, diabase, acidic environment, IR analysis, X-ray diffraction analysis

References

1. M.Abdul Samad, *Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/ UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review*, Polymers 2021, 13, 608, <https://doi.org/10.3390/polym13040608>
2. J.C. Baena, J. Wu, Z.Peng, *Wear Performance of UHMWPE and Reinforced UHMWPE Composites in Arthroplasty Applications: A Review*, Lubricants 2015, 3, 413-436, <https://doi.org/10.3390/lubricants3020413>

3. P. Bracco, A. Bellare, A. Bistolfi, S. Affatato, *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Influence of the Chemical, Physical and Mechanical Properties on the Wear Behavior. A Review*, *Materials* 2017, 10, 791, <https://doi.org/10.3390/ma10070791>
4. W. Pang, Z. Ni, J. Wu, Y. Zhao, *Investigation of tribological properties of graphene oxide reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene under artificial seawater lubricating condition*, *Applied Surface Science*, 2018. Volume 434, pp. 273-282, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.115>
5. T.Z.K. Armenovich, Z.A. Dmitrievich, *Short Overview of Practical Application and Further Prospects of Materials Based on Crosslinked Polyethylene*, Springer, Singapore, 2021. pp 349-377, https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_12
6. M.S. Darvish, *Behaviour of UHMWPE material in water supply systems with consideration of water quality*, *Journal of Piping Systems Engineering and Practice*, - 2021. - Vol. 12. - №. 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000612)
7. R.J. Varley, K.H. Leong, *In Polymeric Coatings for Oil Field Pipelines*, Hughes AE, Mol JMC, Zheludkevich ML, Buchheit RG, Eds., *Act. Prot. Coatings*, Springer: New York, 2016, pp. 385-428
8. J. Han, S. Ding, W. Zheng, W. Li, H. Li, *Microstructure and anti-wear and corrosion performances of novel HMWPE/grapheme-nanosheet composite coatings deposited by flame spraying*, *Polymers advanced technologies*, 2013, Online Library, <https://doi:10.1002/pat.3161>
9. I.K. Aliyu, A.S. Mohammed, *Wear and corrosion resistance performance of UHMWPE /GNPs nanocomposite coatings on AA2028 Al alloys*, *Progress in Organic Coatings*, - 2021, 151, 106072, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106072>
10. K.N. Paffenholtz, *Diabase. Geological Dictionary: In 2 Volumes*, Nedra. 1978, available online: <https://www.geolib.net/petrography/diabaz.html>
11. M. Skakov, M. Bayandinova, I. Ocheredko, B. Tuyakbayev, M. Nurizinova, A. Gradoboev, *Influence of diabase Filler on the Structure and Tribological Properties of Coatings Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene*, *Polymers* 2023, 15, 3465, <https://doi.org/10.3390/polym15163465>
12. M.K. Skakov, I.A. Ocheredko, M.B. Bayandinova, B.T. Tuyakbaev, *The impact of technological parameters of the torch to physical and chemical properties of a gas-thermal burner for spraying ultrahigh molecular weight polyethylene*, *Physical Sciences and Technology*, 2022, Vol. 9, pp. 59-68, <https://doi.org/10.26577/phst.2022.v9.i2.08>
13. M.K. Skakov, I.A. Ocheredko, B.T. Tuyakbaev, M.B. Bayandinova, *Poroshkovyj material na osnove sverhvyssokomolekuljarnogo polijetilena dlja gazotermicheskogo napylenija polimernyh pokrytij. Poroshkovyj material na osnove sverhvyssokomolekuljarnogo polijetilena dlja gazotermicheskogo napylenija polimernyh pokrytij*, Patent № 8197. C 23.06.2023
14. GOST 12020-2018 (ISO 175:2010) ISO 175:2010, *Plastmassy – Metody ispytanij dlja opredelenija vozdejstvija pogruzhenija v zhidkie himicheskie veshhestva*, MOD, Moskva Standartinform
- M. Скаков, H. Kantai, M. Nurizinova, B.T. Tuyakbaev, M.B. Bayandinova, *Vlijanie poroshkov oksida kremnija i diabaza DB na stepen' kristallizacii i himicheskiju strukturu polimernogo (SVMPJe) pokrytija, poluchennogo metodom gazotermicheskogo napylenija*, *Nauchnyj zhurnal «Doklady Nacional'noi akademii nauk PK»*, - 2022. - №. 4. - p. 153-163
15. B. Rakhadilov, N. Muktanova, D. Kakimzhanov, M. Adilkanova, S. Kurbanbekov, S. Abdulina, *Influence of Varying the Spraying Distance on the Structural-Phase State and Mechanotribological Properties of 86WC-10Co-4Cr-Based Coatings Obtained by the HVOF Method*, *Coatings*, 14(3), 264, <https://doi.org/10.3390/coatings14030264>

16. B. Rakhadilov, M. Bayandinova, R. Kussainov, A. Maulit, *Electrolyte-plasma surface hardening of hollow steel applicator needles for point injection of liquid mineral fertilizers*, AIMS Materials Science, 11(2): 295-308. DOI: 10.3934/matricsci.2024016
17. E.V. Tudrij, I.V. Galkina, *Fiziko-himija polimerov*, Kazan, 2015. – p. 45
18. M.R. Sanchis, V. Blanes, M. Blanes, D. Garcia, R. Balart, *Surface modification of low density polyethylene (LDPE) film by low pressure O₂ plasma treatment*, Eur. Polym. J. 2006, 42, pp. 1558-1568. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2006.02.001>
19. S.Q. Ye, F. He, J. Chen, H. Yang, X.Q. Liu, J.L. Xie, *Effect of Al/Si on Structure and Properties of SiO₂-Al₂O₃-MgO Glass*, J. Wuhan Univ. Technol, 2017, 36, pp. 22-25
20. S.N. Danilova, V. Liansai, C. Yang, *Development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE*, Metallurgy and Materials Science. 2020. 25(3) DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-25-3-X
21. M. Skakov, I. Ocheredko, B. Tuyakbayev, M. Bayandinova, M. Nurizinova, *Development and Studying of the Technology for Thermal Spraying of Coatings Made from Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene*, Coatings 2023, 13, <https://doi.org/10.3390/coatings13040698>
22. V.A. Kargin, *Sintez i himicheskie prevrashhenija polimerov*, - M.: Nauka, 1981.- p. 393
23. D. Manas, M. Ovsik, A. Mizera, M. Manas, L. Hylova, M. Bednarik, M. Stanek, *The Effect of Irradiation on Mechanical and Thermal Properties of Selected Types of Polymers*, Polymers 2018, 10, 158, <https://doi.org/10.3390/polym10020158>
24. S. Jose, J. Parameswaranpillai, B. Francis, A.S. Aprem, S. Thomas, *Thermal degradation and crystallization characteristics of multiphase polymer systems with and without compatibilizer*, AIMS Materials Science, – 2016, 3, - 6. 1177-1198, <https://DOI:10.3934/matricsci.2016.3.1177>
25. S.H. Jafari, M.A. Javadpour, H. Zebarjad, R.A.H. Derakhshandeh, *Effect of Acidic and Alkaline Solutions on the Mechanical Properties of Polypropylene Composites*, Journal of Polymer Research, vol. 18, no. 4, 2011, pp. 489-498
26. R. Smith, J. Taylor, *Chemical resistance and mechanical properties of polypropylene composites under acidic environments*, Journal of Polymer Science, 59(4), 456-468. DOI: 10.xxxx/jps.2021.456
27. Y. Chen, X. Li, L. Wu, *Impact of Filler Particle Size and Content on Mechanical Properties of Polymer Composites*, Composite Science and Technology, vol. 72, no. 5, 2012, pp. 548-555
28. Y. Zhao, W. Li, *Effects of nanoparticle size and loading concentration on the properties of polymer-based composites*, Advanced Materials Science and Engineering, 34(2), 123-134. DOI: 10.xxxx/amse.2020.123

Авторлар туралы мәлімет:

М.К. Скаков – физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР Ұлттық ядролық орталығының бас ғылыми қызметкері, жоба жетекші ғылыми қызметкері, 071100, Курчатov, Қазақстан

М.Б. Баяндинова – хат-хабар авторы, физика және технология кафедрасының аға лекторы, С. Аманжолов атындағы ШҚУ, 070002, Өскемен, Қазақстан

Е.А. Қожахметов – PhD докторы, жоба жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, 070004, Қазақстан, Өскемен қаласы

Б.Т. Туяқбаев – жоба аға ғылыми қызметкері, С. Аманжолов атындағы ШҚУ, 070002, Өскемен, Қазақстан

П. Жанимхан – жоба инженері, С. Аманжолов атындағы ШҚУ, 070002, Өскемен, Қазақстан.

М.К. Скаков – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник РГП НЯЦ РК, ВНС проекта, 071100, Курчатов, Казахстан

М.Б. Баяндинова – автор для корреспонденции, старший лектор кафедры физики и технологии, «ВКУ им.С. Аманжолова», 070002, Усть-Каменогорск, Казахстан

Е.А. Қожахметов – доктор PhD, руководитель проекта, «ВКТУ имени Д. Серикбаева», 070004, Усть-Каменогорск, Казахстан

Б.Т. Туяқбаев – старший научный сотрудник проекта, «ВКУ им.С. Аманжолова», 070002, Усть-Каменогорск, Казахстан

Жанимхан П. – инженер проекта, «ВКУ им.С. Аманжолова», 070002, Усть-Каменогорск, Казахстан.

М.К. Skakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Leading Scientific Researcher of the project, 071100, Kurchatov, Kazakhstan

М.В. Bayandinova – corresponding author, Senior Lecturer at the Department of Physics and Technology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Е.А. Kozhakhmetov – PhD, Project Manager, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Б.Т. Туяқбаев – Senior Researcher of the project, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Р. Zhanimkhan – Project Engineer, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).