

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_2

XFTAP 55.22.23

МИКРОПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСІМЕН ГИДРОКСИАПАТИТТІК ЖАБЫНДАРДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ 3D-БАСЫП ШЫҒАРЫЛҒАН ТИТАН ИМПЛАНТТАРЫНЫҢ БИОҮЙЛЕСІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

ПОВЫШЕНИЕ БИОСОВМЕСТИМОСТИ 3D ПЕЧАТНЫХ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ ПУТЕМ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ГИДРОКСИАПАТИТА

ENHANCING THE BIOCOMPATIBILITY OF 3D PRINTED TITANIUM IMPLANTS BY MICROPLASMA SPRAYING OF HYDROXYAPATITE COATINGS

Д.Л. Алонцева ¹, Б.Н. Азаматов ^{1*}, Ю.И. Сафарова ², С.Г. Войнарович ³

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

²National Laboratory Astana, Nazarbayev University, Астана қ., Казахстан

³Е.О. Патон атындағы Украина Ұлттық ғылым академиясының Электрмен дәнекерлеу институты, Киев қ., Украина

*Жауапты автор: Азаматов Бағдат Нурланович, e-mail: bazamatov@ektu.kz

Түйінді сөздер:

селективті лазерлік
балқыту (СЛБ), аддитивті
өндіріс (АӨ),
гидроксиапатит (ГАП),
микроплазмалық бүрку
(МПБ), биоүйлесімді
жабындар, in vitro сынау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Ұзақ мерзімді қызмет ету қабілеті жоғары және биологиялық функционалдық қасиеттерге ие ортопедиялық импланттарға сұраныстың артуы тіңдермен интеграциялануды жақсартуға және бір мезгілде бактериялық колонизацияны төмендетуге мүмкіндік беретін беткі қабатты модификациялау әдістерін әзірлеуге ынталандыруда. Осы зерттеуде аддитивті өндіріс әдісімен дайындалған Ti6Al4V қорытпасынан жасалған кеуекті қаңқалар роботтандырылған микроплазмалық бүрку әдісі арқылы гидроксиапатитпен (ГА) функционалдандырылды. Олардың биологиялық қасиеттері газды-абразивтік өңдеуден өткен Ti6Al4V бетінің қасиеттерімен салыстырыла отырып бағаланды. Беткі қабаттың морфологиясы мен элементтік құрамы сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) және энергия-дисперсиялық рентгендік талдау (EDX) әдістерінің көмегімен зерттелді. Цитосәйкестілік егеуқұйрықтың сүйек кемігінен алынған мезенхималық дің жасушаларын пайдалану арқылы бағаланды. Жасушалардың метаболизмдік белсенділігі Alamar Blue тесті арқылы анықталды. Қаптамалардың бактерияға қарсы қасиеттері Escherichia coli бактериясына қатысты зерттелді. ГА қаптамасын жағу титан бетінің сүтқоректілердің жасушаларымен және бактериялық жасушалармен өзара әрекеттесу сипатын едәуір өзгертті. ГА қаптамасымен модификацияланған қаңқалар қапталмаған Ti6Al4V бақылау үлгілерімен салыстырғанда мезенхималық дің жасушаларының жоғары метаболизмдік белсенділігін және жасушалық адгезияның айқын жоғарылауын қамтамасыз етті.



© 2026 Д.Л. Алонцева, Б.Н. Азаматов, Ю.И. Сафарова, С.Г. Войнарович
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Бұл ретте жасушалардың өміршеңдік көрсеткішінің артуы 56 % құрады. Сонымен қатар, *E. coli* бактерияларының пролиферациясының тежелуі байқалды: 15 сағат инкубациядан кейін бактериялардың өсуі шамамен 30 %-ға төмендеді. Алынған нәтижелер гидроксипатит қаптамасын микроплазмалық бұрку әдісімен жағу аддитивті өндіріс арқылы дайындалған титан қаңқаларының цитосәйкестілігін арттыруға және бактериялық өсуін тежеуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Осылайша, аддитивті өндіріс технологиясы мен беткі қабатты бақыланатын плазмалық модификациялау әдісін үйлестіру биологиялық қасиеттері жақсартылған кеуекті титан импланттарын жасаудың перспективалы бағыты болып табылады.

Ключевые слова:

селективное лазерное плавление (СЛП), аддитивное производство (АП), гидроксипатит (ГАП), микроплазменное напыление (МПН), биосовместимые покрытия, тестирование in vitro.

АННОТАЦИЯ

Растущий спрос на долговечные и биологически функциональные ортопедические имплантаты стимулирует разработку методов модификации поверхности, способных улучшать интеграцию с тканями и одновременно снижать бактериальную колонизацию. В настоящем исследовании пористые каркасы из сплава Ti6Al4V, изготовленные методом аддитивного производства, были функционализированы гидроксипатитом (ГАП) с использованием роботизированного микроплазменного напыления. Их биологические свойства оценивали в сравнении с поверхностью Ti6Al4V после газоабразивной обработки. Морфологию поверхности и элементный состав исследовали методом сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM-EDX). Цитосовместимость оценивали с использованием мезенхимальных стволовых клеток костного мозга крысы, при этом метаболическую активность клеток определяли с помощью теста Alamar Blue. Антибактериальные свойства покрытий исследовали в отношении *Escherichia coli*. Нанесение ГАП существенно изменило характер взаимодействия титановой поверхности как с клетками млекопитающих, так и с бактериальными клетками. Каркасы с ГАП-покрытием обеспечивали более высокую метаболическую активность МСК и более выраженную клеточную адгезию по сравнению с контрольными образцами Ti6Al4V без покрытия; увеличение показателя жизнеспособности клеток составило 56 %. Одновременно наблюдалось подавление пролиферации *E. coli*: через 15 часов инкубации рост бактерий был приблизительно на 30 % ниже. Полученные результаты показывают, что нанесение ГАП методом микроплазменного напыления позволяет придать аддитивно изготовленным титановым каркасам благоприятное сочетание цитосовместимости и устойчивости к бактериальному росту. Таким образом, сочетание аддитивного производства и контролируемой плазменной модификации поверхности представляет собой перспективный подход к созданию пористых титановых имплантатов с улучшенными биологическими характеристиками.

keywords:

selective laser melting (SLM), additive manufacturing (AM), hydroxyapatite (HAp), microplasma spraying (MPS), biocompatible coatings, in vitro testing.

ABSTRACT

The growing demand for durable and biologically functional orthopedic implants has stimulated the development of surface-modification strategies capable of improving tissue integration while limiting bacterial colonization. In this study, porous Ti6Al4V scaffolds produced by additive manufacturing were functionalized with hydroxyapatite (HAP) using robotic microplasma spraying, and their biological performance was evaluated in comparison with gas-abrasive-treated Ti6Al4V surfaces.

Surface morphology and elemental composition were examined by scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM–EDX). Cytocompatibility was assessed using rat bone marrow-derived mesenchymal stem cells, with metabolic activity quantified by the Alamar Blue assay, while antibacterial performance was evaluated against *Escherichia coli*. HAP deposition markedly altered the interaction of the titanium surface with both mammalian and bacterial cells. The coated scaffolds supported greater MSC metabolic activity and more extensive cellular attachment than the uncoated Ti6Al4V reference, with cell viability increasing by 56%. At the same time, *E. coli* proliferation was suppressed, with bacterial growth approximately 30% lower after 15 h of incubation. These findings demonstrate that microplasma-deposited HAP can provide additively manufactured titanium scaffolds with a favorable combination of cytocompatibility and resistance to bacterial growth. The integration of additive manufacturing with controlled plasma-based surface functionalization therefore represents a promising approach for the development of porous titanium implants with improved biological performance.

КІРІСПЕ

Гидроксипатит (ГА) – апатиттер тобына жататын, негізгі кальций фосфаты ретінде белгілі $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ қосылысы. ГА-ның бірегей ерекшеліктерінің бірі оның стехиометриялық емес құрамымен сипатталуы болып табылады, бұл әдетте Са/Р қатынасы арқылы өрнектеледі. ГА алтыбұрышты кристалдық құрылымға ие және суда ерігіштігінің төмендігімен, әлсіз сілтілік қасиетімен, жоғары кеуектілігімен және беткі қабатта адсорбциялау қабілетінің жоғарылығымен сипатталады. Үйек тінінің негізгі минералдық құрамдас бөлігі ретінде ГА ортопедия мен стоматологияда қолданылатын синтетикалық материалдардың маңызды компоненттерінің бірі болып табылады (Redhwi et al., 2024; Dorozhkin, 2024).

ГА-ның төмен ерігіштігі мен жоғары сығылу беріктігі оның эндопротездеу материалдары ретінде қолданылуын қамтамасыз ететін маңызды қасиеттер болып табылады және бұл қасиеттер негізінен оның құрамындағы кальций мен фосфаттарға байланысты қамтамасыз етіледі. Сонымен қатар, ГА-ның кеуекті құрылымы қоректік заттардың алмасуын, сондай-ақ сүйек тіні мен қан тамырларының имплантат құрылымына өсуін қолдайды. Адам мен жануарлар сүйектерінің негізгі бейорганикалық минералдық компоненті ретінде ГА уытты емес, сонымен қатар остеокондуктивтік және остеоиндуктивтік қасиеттерге ие, бұл Liu et al. (2024) шолуында көрсетілген.

ГА сүйек тінін қалпына келтіруге арналған ең көп зерттелген биокерамикалық материалдардың бірі болғанына қарамастан, оған деген ғылыми қызығушылық төмендеп отырған жоқ. Мұны Phagare (2024) келтірген Hydroxyapatite Market Report 2025 жаһандық нарықтық есебінің деректері де растайды. 2025 жылға арналған кешенді нарықтық талдау мен болжамға сәйкес, ГА өзінің биосәйкестілігі және табиғи сүйек тініне ұқсастығы арқасында ортопедиялық операцияларда, стоматологиялық имплантаттар мен сүйек трансплантаттарында қолдануға өте қолайлы материал болып табылады. Медициналық процедуралардың осы түрлеріне деген қажеттіліктің артуы халықтың қартаюымен және ортопедиялық әрі стоматологиялық аурулардың таралуының өсуімен байланысты.

Сонымен қатар, сүйек регенерациясы мен тіндік инженерияда ГА-ны қолданудың кеңеюіне және ГА-ның өзін, сондай-ақ оның негізінде жасалатын медициналық бұйымдарды өндіру процестерінің тиімділігі мен өнімділігін арттыру үшін жаңа цифрлық технологияларды енгізу қажеттілігіне ерекше назар аударылады.

Ортопедиялық протездеуде ГА қаптамалары имплантаттың қажетті механикалық беріктігін қамтамасыз ететін биологиялық тұрғыдан инертті материалдардың, әдетте титан негізіндегі қорытпалардың, бетіне жағылады. Бұл Nicholson (2020) және Pandey et al. (2020) шолуларында атап көрсетілген.

ГА негізіндегі қаптамаларды әзірлеу мен зерттеу бағытында ауқымды ғылыми жұмыстар жүргізіліп келе жатқанына қарамастан, кальций-фосфатты керамикалық материалға деген қызығушылық әлі де жоғары деңгейде қалып отыр. Қазіргі таңда зерттеушілер оның биобелсенділігін арттырумен қатар, имплантат бетіне бактерияға қарсы қасиеттер беру мақсатында ГА қаптамаларының құрамы мен құрылымын түрлендірудің жаңа тәсілдерін ұсынуды жалғастыруда.

Мұндай тәсілдерге күміс бөлшектерін енгізу, ГА құрамын басқа металл элементтерімен легірлеу, металл емес компоненттерді немесе композициялық органикалық заттарды қосу, сондай-ақ наноқұрылымды элементтерді қалыптастыру жатады. Сонымен бірге ГА синтездеу технологияларын жетілдіруге және оларды аддитивті өндіріс (АӨ) технологияларымен интеграциялауға ерекше назар аударылуда, бұл Wan et al. (2024) және Vijayan et al. (2025) шолуларында атап көрсетілген.

Буындарды эндопротездеу операциясынан кейін пациенттің жылдам қалпына келуін қамтамасыз етуде имплантаттың пациенттің сүйек тінімен бірігу қабілеті, операциядан кейінгі инфекциялардың болмауы және имплантаттың бұзылмауы маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, имплантаттың пациенттің анатомиялық ерекшеліктеріне сәйкес келуі, жоғары беріктікке және коррозияға төзімділікке ие болуы аса маңызды. Осы талаптарды қамтамасыз ету үшін имплантаттың биосәйкестілігі мен оссеоинтеграциясын арттыру, сондай-ақ перипротездік инфекциялардың алдын алу мақсатында титан қорытпаларынан 3D-басып шығару әдісімен пациенттің жеке анатомиялық ерекшеліктеріне сәйкес келетін кеуекті имплантаттарды дайындау және кейіннен олардың бетіне ГА қаптамаларын жағу перспективалы бағыт болып табылады.

3D-басып шығару (немесе аддитивті өндіріс, АӨ) жекелендірілген эндопротездерді жобалауға және дайындауға мүмкіндік береді, сондай-ақ кеуектілік мөлшері бақыланатын микрокеуекті құрылымдарды өндіру үшін қолданылады. 3D-басып шығарылатын кеуекті имплантат-эндопротездерді дайындауға арналған негізгі биосәйкесті металл материалдарға титан қорытпалары, соның ішінде селективті лазерлік балқыту (СЛБ) әдісінде қолданылатын ұнтақты қорытпалар жатады, бұл Pandey et al. (2020) еңбегінде көрсетілген.

Пациенттің жеке анатомиялық ерекшеліктеріне сәйкес келетін металл имплантаттарды өндіруге арналған негізгі АӨ технологияларының бірі болып табылатын СЛБ әдісі имплантаттарды тікелей гидроксипатиттен және әртүрлі биосәйкесті керамикалық материалдардан өндіруге де мүмкіндік береді. Бұл Asghari Adib et al. (2020) және Vijayan et al. (2025) еңбектерінде атап көрсетілген. Алайда қазіргі уақытта мұндай тәсіл кеңінен қолданылатын негізгі технологияға айналған жоқ, себебі мұндай имплантаттардың өзіндік құны жоғары және олардың механикалық беріктігін жан-жақты зерттеуді қажет етеді.

Қазіргі уақытта металл имплантаттарға ГА қаптамаларын жағудың көптеген әдістері бар. Алайда бұл технологиялардың елеулі кемшіліктері кездеседі. Мысалы, золь-гель, электрофоретикалық немесе электролиттік тұндыру әдістері, әдетте, қаптаманың жоғары кристалдылық дәрежесін қамтамасыз ете алмайды, сондықтан қосымша термиялық өңдеуді қажет етеді, бұл Liu et al. (2024) шолуында атап көрсетілген.

Сонымен қатар, төсеніштер мен қаптамалардың ерітінді компоненттерімен ластануы, соның салдарынан қаптаманың адгезиясының жеткіліксіз болуы, сондай-ақ қаптаманың элементтік және фазалық құрамының қайталанымдылығын қамтамасыз ету

мәселелері бар. Биомиметикалық әдіс жақсы қайталанымдылықты қамтамасыз етеді, алайда бұл әдіс өте баяу жүреді және қаптама мен төсеніштің ластану мәселесін шешпейді.

Қаптамалардың құрамы мен құрылымының жоғары қайталанымдылығына вакуумдық тұндыру әдістері — электрондық-сәулелік тозаңдату, лазерлік абляция, иондық-сәулелік тозаңдату және жоғары жиілікті магнетрондық тозаңдату арқылы қол жеткізуге болады. Алайда бұл әдістер қымбат жабдықты қажет етеді, жоғары вакуум жағдайында жүргізіледі және имплантаттардың өлшемдеріне қатысты белгілі бір шектеулерге ие.

Термиялық плазмалық бүрку технологиялық үдерістің салыстырмалы түрде қарапайымдылығы, экономикалық тиімділігі және аддитивті өндіріс әдістерімен дайындалған имплантаттардың бетіне жабын қалыптастыру мүмкіндігі тұрғысынан перспективалы әдістердің бірі болып табылады (Prasad et al., 2025).

Алайда атмосфералық қысым жағдайында жүзеге асырылатын дәстүрлі термиялық плазмалық бүрку қаптамалардың фазалық біртектілігін бұзуы және плазмалық ағын температурасының өте жоғары болуына байланысты төсеніш материалының тұтқырлығын едәуір төмендетуі мүмкін. Имплантаттың шамадан тыс қызуы мәселесін шешу үшін гидроксипатитті суық бүрку (Bikmeyer et al., 2025; Blum et al., 2021), ГА ұнтақтарының суспензияларын пайдалана отырып дәстүрлі термиялық плазмалық бүрку (Abir et al., 2022), сондай-ақ ГА ұнтақтарын қолданатын микроплазмалық бүрку (МПБ) технологиялары (Alontseva et al., 2023, 2025; Kussaiyn-Murat et al., 2025) сияқты баламалы тәсілдер ұсынылды.

Шағын өлшемді эндопротездік имплантаттарға (мысалы, шынтақ буынының компоненттеріне, стоматологиялық имплантаттарға, омыртқааралық дискілерге) биосәйкесті қаптамаларды жағудың перспективалы тәсілдерінің бірі — микроплазмалық бүрку (МПБ). Бұл әдіс әртүрлі төсеніштердің бетіне ұнтақ немесе сым түріндегі материалдардан қаптамалар жағуға мүмкіндік береді. Бүрку дақтарының диаметрінің шағын болуы (3–5 мм) дәстүрлі термиялық плазмалық бүркумен салыстырғанда материалдың шығынын едәуір азайтады.

Сонымен қатар, микроплазматронның төмен қуаты төсенішке түсетін жылулық әсерді барынша азайтады, бұл жұқа қабырғалы немесе шағын өлшемді компоненттерді деформациясыз және шамадан тыс қыздырмай қаптауға мүмкіндік береді. МПБ әдісі отқа төзімді және биосәйкесті металдардан (мысалы, Ti, Ta) және олардың қорытпаларынан кеуекті қаптамалар алуға (Alontseva et al., 2023), сондай-ақ керамикалық материалдардан, соның ішінде гидроксипатиттен (ГА), қаптамалар қалыптастыруға мүмкіндік береді (Alontseva et al., 2025). Мұндай қаптамалар имплантаттың биосәйкестілігін арттырып, қаптаманың кеуектеріне сүйек тінінің өсуі арқылы имплантаттың бекітілуін жақсартады.

Қазіргі уақытта роботтандырылған МПБ технологиясын және атап айтқанда микроплазматронның қозғалысын басқарудың жаңа алгоритмін қолданудың арқасында (Kussaiyn-Murat et al., 2025) өте күрделі геометриялық пішіндегі беттерге қаптамаларды жағу мүмкіндігі пайда болды. Бұл ретте бүрку қашықтығы, плазмалық ағынның төсеніш бетіне перпендикуляр түсуі және микроплазматронның төсеніш беті бойымен тұрақты сызықтық жылдамдықпен қозғалу жылдамдығы сияқты бүрку параметрлерінің дәл сақталуы қамтамасыз етіледі.

Авторлардың 3D-басып шығару әдісімен имплантаттар мен қаңқаларды дайындауда (Alontseva et al., 2025), сондай-ақ МПБ үшін ГА синтездеуде (Alontseva et al., 2018) және 3D-басып шығару әдісімен дайындалған төсеніштерге ГА қаптамаларын роботтандырылған микроплазмалық бүрку арқылы жағуда (Alontseva et al., 2025) табысты тәжірибесі бар. Имплантаттың беткі қабатын өңдеу параметрлерін таңдаудың негізгі критерийі оның биосәйкестілігін арттыру болғанын атап өткен жөн. Осыған байланысты ГА

қаптамаларының кеуектілігінің МПБ параметрлеріне тәуелділігі анықталды, кеуектілік пен бетінің кедір-бұдырлығының биосәйкестілікке әсері талданды, сондай-ақ газды-абразивтік өңдеуден өткен титан қорытпасынан жасалған төсеніштердегі әртүрлі қаптамалардың биосәйкестілік сипаттамалары салыстырылды (Alontseva et al., 2025).

Сонымен қатар, кеуекті титан қаңқаларына микроплазмалық бүрку әдісімен жағылған ГА қаптамаларының биосәйкестілігін зерттеу жұмыстарының бұрын жүргізілмегенін атап өткен жөн.

Осы мақалада сертификатталған медициналық титан қорытпасының ұнтағын пайдалана отырып, селективті лазерлік балқыту (СЛБ) әдісімен дайындалған төсеніштерге зертханада синтезделген ГА ұнтағынан роботтандырылған микроплазмалық бүрку арқылы жағылған қаптамалардың *in vitro* жағдайындағы биосәйкестілігін зерттеудің жаңа нәтижелері ұсынылады.

Алдыңғы зерттеуде (Alontseva et al., 2018) МПБ-ның оңтайландырылған параметрлері құрамында ГА фазасының мөлшері 95 %, кристалдылық дәрежесі 93% және 3D-басып шығару әдісімен дайындалған титан төсенішке адгезиялық беріктігі $24,7 \pm 5,7$ МПа болатын ГА қаптамаларын алуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Бұл көрсеткіштер имплантаттарға арналған қаптамаларға қойылатын ISO 13779-2:2018 халықаралық медициналық стандартының талаптарына сәйкес келеді (British Standards Institution, 2018).

Осы зерттеудің мақсаты – ГА қаптамасының биобелсенділігін арттыруға мүмкіндік беретін МПБ-ның оңтайландырылған параметрлерін таңдау гипотезасын *in vitro* тестілеу арқылы тексеру. Зерттеудің түпкі мақсаты – бетінің биосәйкестілігі жоғары, пациенттің жеке ерекшеліктеріне сәйкес келетін имплантаттарды дайындау үшін цифрлық роботтандырылған МПБ және аддитивті өндіріс технологияларын интеграциялау.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Кеуекті төсеніштер сертификатталған Ti-64 титан қорытпасының ұнтағын пайдалана отырып, селективті лазерлік балқыту (СЛБ) әдісімен дайындалды. Үлгілерді дайындау цифрлық 3D-модельдер негізінде жүзеге асырылды және металл компоненттерін өндіруге арнайы әзірленген Mlab cusing R аддитивті өндіріс жүйесі (Concept Laser, Лихтенфельс, Германия) қолданылды.

Микроплазмалық бүрку арқылы қаптама жағуға арнайы синтезделген ГА ұнтағы Е.О. Патон атындағы электрмен дәнекерлеу институтының зертханаларында дайындалды. Синтездеу процедурасы Ca/P қатынасын 1,65 деңгейіне жеткізу мақсатында химиялық тұндыру әдісін қолдануға негізделген және бұған дейінгі жұмыста толық сипатталған (Alontseva et al., 2018).

Төсеніштердің визуализациясы мен кеуектілігін талдау Phoenix Vtomex M300 өнеркәсіптік компьютерлік томография жүйесі (Waygate Technologies, Германия) көмегімен жүргізілді. Барлық үлгілерді сканерлеу және алынған деректерді кейінгі өңдеу VGStudioMAX бағдарламалық жасақтамасы (Volume Graphics GmbH, Германия) арқылы жүзеге асырылды. Бұл бағдарламалық құрал кері инженерия әдісімен көлемдік реконструкция жүргізуге мүмкіндік берді.

СЛБ параметрлері титан қорытпасының ұнтағын және Mlab cusing R СЛБ жүйесін өндіруші ұсынған нұсқаулықтар негізінде таңдалды (Concept Laser, Лихтенфельс, Германия). Параметрлерді таңдау әдістемесі бұған дейінгі зерттеуде толық сипатталған (Alontseva et al., 2025). МПБ алдында қаңқалар спирт ерітіндісінде ультрадыбыстық тазалаудан өткізілді.

ГА қаптамаларын МПБ әдісімен жағу үшін диаметрі 10 мм Ti6Al4V қорытпасынан жасалған өзектерден кесіліп алынған қалыңдығы 2 мм дискілер түріндегі қосымша төсеніштер дайындалды. Бұл үлгілердің беті Contracor ECO құммен үрлеу қондырғысы

(Comprag Group GmbH, Вупперталь, Германия) арқылы A14 маркалы қалыпты сападағы электрокорундты алюминий тотығын пайдаланып, газды-абразивтік өңдеуден өткізілді. Өңдеу параметрлері бұған дейінгі зерттеуде сипатталған әдістемеге сәйкес таңдалды (Alontseva et al., 2025).

ГА ұнтағын тұндыруға арналған МПБ параметрлерін таңдау титан төсеніштеріне ГА қаптамаларын МПБ арқылы жағу бойынша жүргізілген эксперимент нәтижелерін талдауға негізделді. Эксперимент Тагучидің бөлшектік факторлық жоспары негізінде жүргізілген және бұған дейінгі жұмыстарда сипатталған (Alontseva et al., 2018, 2023).

ГА қаптамаларының қажетті тазалығы мен кристаллдылығына қол жеткізу үшін келесі параметрлер оңтайлы деп таңдалды: электр тогының күші (I) — 45 А, плазма түзуші газдың шығыны (Q) — 1,0 slpm, бүрку қашықтығы (H) — 160 мм және ұнтақты беру жылдамдығы (V_{prow}) — 0,4 г·мин⁻¹.

ГА ұнтақтарын МПБ Е.О. Патон атындағы электрмен дәнекерлеу институтында (Киев, Украина) әзірленген MPS-004 қондырғысы арқылы жүргізілді. Микроплазматрон өнеркәсіптік роботтандырылған қолға (Kawasaki RS-010LA, Kawasaki Robotics, Токио, Жапония) орнатылды, бұл бағдарламаланған траектория бойымен көлденең бағытта бақыланатын жылдамдықпен қозғалысты қамтамасыз етті. Плазмалық бүрку барысында қаптаманың біркелкі қалыңдығын алу үшін 50 мм·с⁻¹ сызықтық қозғалыс жылдамдығы эксперименттік түрде оңтайлы деп анықталды. МПБ процесінде плазма түзуші және ұнтақты тасымалдаушы газ ретінде аргон (Ar) пайдаланылды, ал төсеніштерге қосымша қыздыру жүргізілген жоқ.

Қаптаманың микроструктурасын зерттеу және элементтік құрамын бағалау INCA ENERGY энергия-дисперсиялық рентгендік микроанализ жүйесімен (Oxford Instruments, Ұлыбритания) жабдықталған JSM-6390LV сканерлеуші электрондық микроскопы (JEOL, Токио, Жапония) арқылы жүргізілді.

Егеуқұйрықтың сүйек кемігінен алынған мезенхималық дің жасушаларының (МДЖ) *in vitro* жағдайындағы өміршеңдігін бағалау үшін Alamar Blue реагенті (DAL1025, Thermo Fisher) қолданылды. Әрбір 96 ұяшықты планшеттің ұяшығына 6×10^3 МДЖ себіліп, имплантатпен толықтырылған қоректік ортада 72 сағат бойы инкубацияланды (3 тәулік). Екі тәуліктен кейін әр ұяшыққа 10 мкл Alamar Blue реагенті қосылып, 2 сағат бойы инкубацияланды. Содан кейін оптикалық тығыздық 570 нм толқын ұзындығында BioTek Synergy H1 микропланшет ридері (АҚШ) көмегімен өлшенді.

Егеуқұйрықтың сүйек кемігінен алынған МДЖ ГА қаптамасы бар және қаптамасыз титан дискілерінің бетіне әрбір дискке 1×10^4 жасуша концентрациясында себіліп, толық DMEM қоректік ортасында 48 сағат бойы инкубацияланды. Инкубациядан кейін жасушалар 10 минут бойы 2% параформальдегидпен бекітіліп, 1 М осмий тетроксиді ерітіндісімен 1 сағат бойы боялды. Содан кейін үлгілер Milli-Q тазартылған сумен әрқайсысы 10 минуттан екі рет жуылды және этанол концентрациясын біртіндеп арттыру арқылы (70 %-дан 100 %-ға дейін) сусыздандырылды. Бұдан кейін үлгілер гексаметилдисилазанмен (HMDS) 30 минут бойы өңделіп, тағы 30 минут кептірілді.

Талдау жүргізер алдында үлгілердің бетіне қалыңдығы 20 нм болатын алтын қабаты жағылды. Беткі топография JSM-IT200(LA) сканерлеуші электрондық микроскопы (JEOL, Токио, Жапония) арқылы зерттелді. Сонымен қатар, осы микроскоп *in vitro* тестілеуден кейінгі үлгілерді зерттеу үшін де пайдаланылды. Бақылау алдында үлгі беттері Q150T ES пашыратқыш қаптама жағу қондырғысы (Quorum Technologies, Лондон, Ұлыбритания) арқылы 60 секунд ішінде қалыңдығы 20 нм алтын қабатымен қапталды.

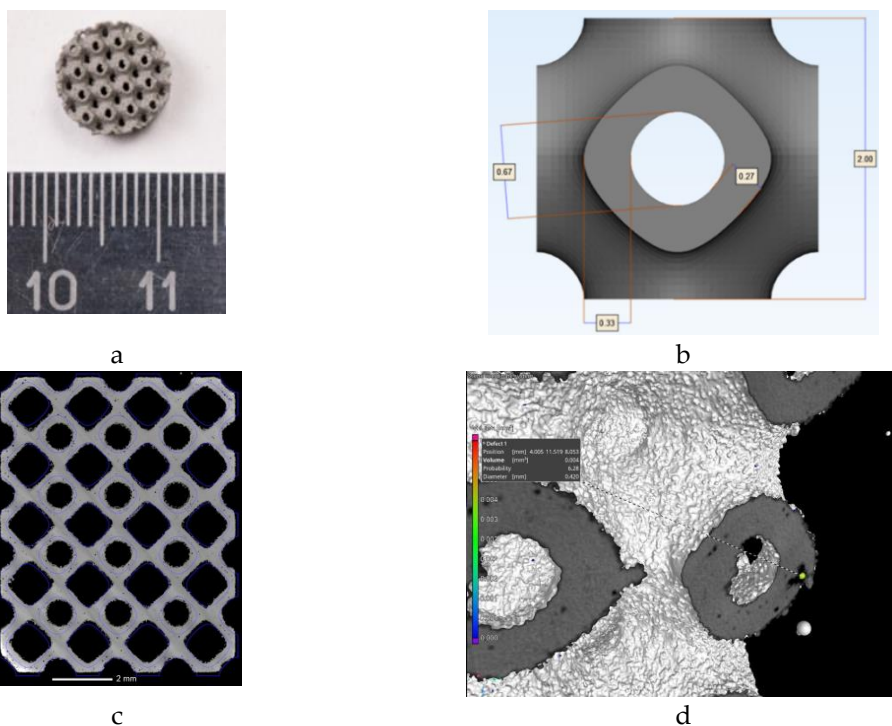
In vitro жағдайындағы бактерияға қарсы белсенділікті талдау Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI, 2020) ұсынымдарына сәйкес жүргізілді. Бактериялардың өсу

қисығын анықтау үшін микробқа қарсы препараттарға сезімталдықты анықтауға арналған CLSI стандарттарына сәйкес келетін әдіс қолданылды.

Эксперимент жүргізу үшін 96 ұяшықты планшет дайындалып, онда *E. coli* HB101/K12 (кат. № 1660408) өсірілді. *E. coli* өсіру үшін стерильді LB қоректік ортасы (Bio-Rad) пайдаланылды. Асептикалық техника сақтала отырып, бактериялық культураның 100 мкл көлемі OD600 бойынша МакФарланд шкаласының 0,5 тығыздығына дейін жеткізілді, бұл 1×10^8 КОЕ/мл концентрациясына сәйкес келеді, содан кейін әрбір үлгіге арналған ұяшыққа енгізілді. Планшеттер Biotek H5 көпұяшықты ридерінде (Biotek, АҚШ) 37 °С температурада 24 сағат бойы инкубацияланды, бұл ретте OD600 көрсеткіштері әр сағат сайын өлшенді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

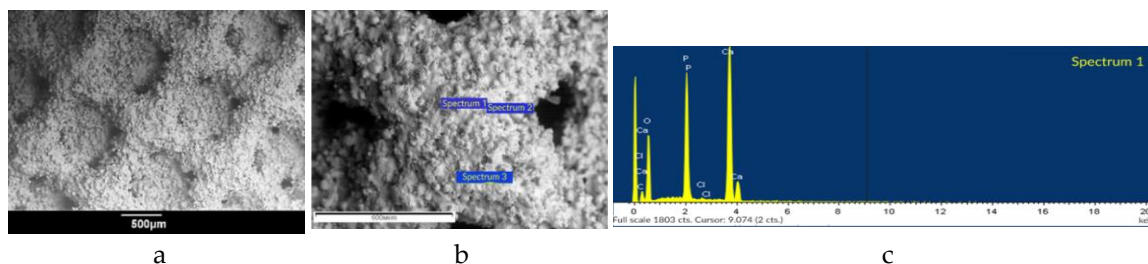
Диаметрі 10 мм, қалыңдығы 2 мм және бір ұяшықтың кеуек диаметрі 670 мкм болатын 3D-басып шығару әдісімен дайындалған кеуекті қаңқа дискісі 1a-суретте көрсетілген. Оның ұяшық өлшемдері көрсетілген стереолитографиялық (STL) моделі 1b-суретте берілген. Бүкіл қаңқаның орташа кеуектілігі 72% құрады. Үлгінің көлденең қималарындағы модельден ауытқулардың визуализациясы 1c-суретте, ал компьютерлік томография (КТ) әдісімен анықталған ақаулардың ішіндегі ең ірісі 1d-суретте көрсетілген.



1-сурет. 3D-басып шығару әдісімен дайындалған қаңқа-диск үлгісі (a), ұяшық өлшемдері көрсетілген қаңқаның СТ-моделі (b), қималардағы ауытқулардың компьютерлік томография (КТ) арқылы визуализациясы, модель контурлары көк түспен көрсетілген (c), анықталған ақаулардың ішіндегі ең ірісі (көлемі – 0,0004 мм³, ұзындығы – 0,42 мм) (d).

Ескерту – авторлар құрастырған

Кеуекті титан қаңқасындағы ГА қаптамасының SEM кескіні 2, a, b-суреттерде көрсетілген. Қаптаманың қаңқа бетіне біркелкі таралғаны және оның ірі кеуектерін ашық күйде қалдыратыны көрінеді. 2, b-суретте көрсетілген нүктелердегі қаптаманың химиялық құрамына жүргізілген EDX-талдау нәтижелері 1-кестеде берілген, ал 2, c-суретте спектрлердің бірінің көрінісі көрсетілген.



2-сурет. 3D-басып шығару әдісімен дайындалған қаңқадағы ГА қаптамасының жалпы көрінісінің SEM кескіні (a); EDX-талдау жүргізілген аймақтар көрсетілген ГА қаптамасы бетінің SEM кескіні (b); спектрді талдау нәтижелері (c)

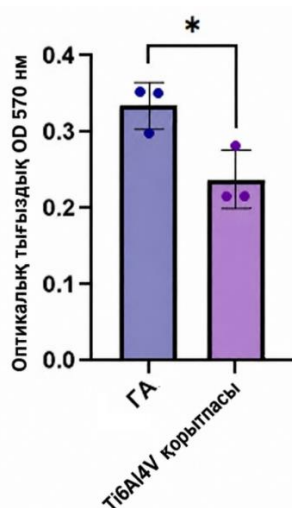
Ескерту – авторлар құрастырған

1-кесте. 2-суретте көрсетілген ГА қаптамасының спектрлеріндегі барлық элементтердің EDX-талдауының нормаланған нәтижелері (масс. %)

Спектр	Стастикалық көрсеткіштерде	O	P	Cl	Ca	Барлығы	Спектр
1 спектр	да	53.41	16.95	1.27	28.37	100.00	1 спектр
2 спектр	да	50.55	17.99	1.30	30.16	100.00	2 спектр
3 спектр	да	51.25	18.50	-	30.25	100.00	3 спектр
Макс.		53.41	18.50	1.30	30.25		Макс.
Мин.		50.55	16.95	1.27	28.37		Мин.

Ескерту – авторлар құрастырған

Биосәйкестілікті бағалау алдымен қаптамамен модификацияланған имплантаттардың цитоуытты әсерін жасушалардың өміршеңдік көрсеткіші бойынша анықтаудан басталды. 3-суретте Alamar Blue тестінің нәтижелері көрсетілген.



3-сурет. Alamar Blue тесті арқылы жасушалардың өміршеңдігін бағалау

Ескерту – авторлар құрастырған

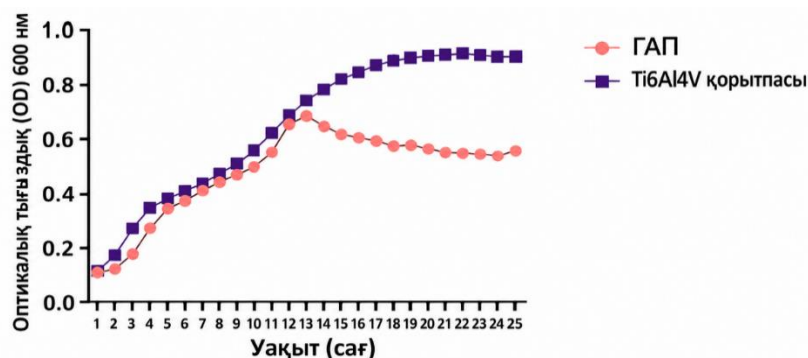
3-суретте ГА қаптамасы бар үлгілердегі жасушалардың өміршеңдік көрсеткішінің (абсорбция мәні шамамен 0,32) Ti6Al4V үлгілерімен (шамамен 0,18) салыстырғанда едәуір

жоғары екені көрсетілген. Бұл ГА қаптамасы бетінде жасушалардың метаболизмдік белсенділігі мен пролиферациясының жоғары екенін көрсетеді. ГА тобы үшін абсорбция мәнінің жоғары болуы (3-сурет) оның Ti6Al4V қорытпасымен салыстырғанда жасушалардың өсуі мен метаболизмдік белсенділігін тиімдірек қолдайтынын білдіреді. Мұны ГА-ның биобелсенді табиғатымен түсіндіруге болады, өйткені ол жасушалардың бетке бекінуі мен пролиферациясын ынталандырады және осылайша күшті оссеоинтеграцияны қажет ететін имплантаттар үшін неғұрлым қолайлы материал болып табылады. Ti6Al4V қорытпасы өзінің жоғары механикалық беріктігі мен коррозияға төзімділігімен белгілі болғанымен, жасушалардың оңтайлы өсуін қамтамасыз ететін биобелсенділігі жеткіліксіз болуы мүмкін, бұл абсорбцияның төмен мәндерін түсіндіреді.

Алынған нәтижелер гидроксипатитпен модификацияланған беттердің жоғары цитосәйкестілігін көрсететін бұрынғы зерттеулердің нәтижелерімен сәйкес келеді. Мысалы, de Lima Cavalcanti et al. (2019) 24 сағаттан кейін нанобөлшекті гидроксипатитпен белсендірілген беттердегі жасушалардың өміршеңдік көрсеткішінің ($0,69 \pm 0,27$) механикалық өңдеуден өткен титан бетімен ($0,26 \pm 0,12$) салыстырғанда едәуір жоғары болғанын анықтаған. Бұл жасушалардың бастапқы адгезиясы мен бетпен өзара әрекеттесуінің жақсарғанын көрсетеді. Сол сияқты, Martinez et al. (2018) гидроксипатит нанокристалдары бар наноинженерлік беттерде жасушалардың пролиферациясы мен өміршеңдігінің артқанын, әсіресе 72 сағаттан кейін бұл көрсеткіштердің дәстүрлі қосарланған қышқылдық өңдеуден өткен беттермен салыстырғанда жоғары болғанын көрсетті. Аталған зерттеулер гидроксипатит қаптамаларының наноқұрылымы мен химиялық құрамының жасушалардың функционалдық белсенділігін жақсартуға ықпал ететінін растайды.

Алайда қарама-қайшы нәтижелер де кездеседі. Vilardell et al. (2018) зерттеуінде 1 тәуліктен кейін титан қаптамаларындағы жасушалардың бастапқы өміршеңдігі ГА қаптамаларымен салыстырғанда жоғары болған. Бұл бетінің кедір-бұдырлығы, суланғыштығы және топографиясы сияқты сипаттамалардың жасушалардың бастапқы реакцияларына әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Осы айырмашылықтарға қарамастан, зерттеулердің жиынтық нәтижелері гидроксипатит негізіндегі қаптамалардың биосәйкестілікті арттырудағы жоғары әлеуетін көрсетеді, әсіресе олар наномасштапта жобаланған жағдайда. Бұл тұжырымдар осы зерттеуде алынған нәтижелермен де расталады.

ГА қаптамасы бар және қаптамасыз Ti6Al4V қорытпасынан жасалған беттердің бактерияға қарсы қасиеттері Escherichia coli бактериясына қатысты бактериялық өсуін тежеу тесті арқылы бағаланды. Зерттеу нәтижелері 4-суретте көрсетілген.



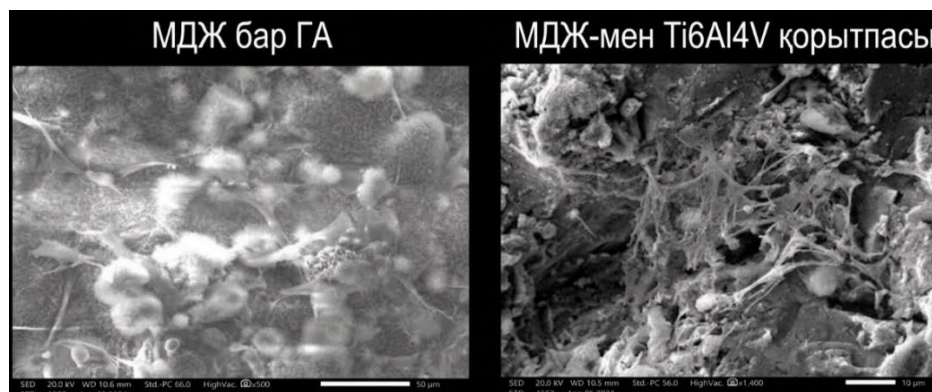
4-сурет. ГА қаптамасы жағылған титан имплантаты мен газды-абразивтік өңдеуден өткен Ti6Al4V қорытпасының E. coli бактериясына қатысты бактерияға қарсы белсенділігін зерттеу

Ескерту – авторлар құрастырған

Бастапқы лаг-фаза мен экспоненциалдық фазада (шамамен 12 сағатқа дейін) ГА және титан қорытпасынан жасалған екі бет те бактериялардың өсуіне салыстырмалы түрде бірдей жағдай жасады, бұл абсорбция көрсеткіштерінің ұқсас жоғарылау динамикасынан байқалады. Алайда 12 сағаттан кейін бактериялардың пролиферациясында айқын айырмашылық байқалды (4-сурет). Титан қорытпасының бетінде бактериялар саны өсуін жалғастырып, кейін тұрақтанып, OD600 мәні шамамен 1,0 деңгейіне жеткен кезде, ГА тобында абсорбция көрсеткішінің біртіндеп төмен өсу динамикасы тіркелді. Бұл плато ГА қаптамасы болған жағдайда бактериялардың өміршеңдігі немесе метаболизмдік белсенділігі тежелетінін көрсетеді. Инкубация кезеңінің соңында ГА қаптамасы бар беттермен жанасқан культуралардағы OD600 мәні шамамен 0,6 деңгейінде сақталды, ал титан қорытпасы тобында абсорбцияның жоғары мәндері байқалды.

Алынған нәтижелер гидроксипатит бетінің өзіне тән бактерияға қарсы әлеуетін көрсетуі мүмкін. Бұл қасиет оның бетінің кедір-бұдырлығы, электрлік заряды және иондарды бөлу қабілеті сияқты физика-химиялық қасиеттерімен байланысты болуы ықтимал.

Қаптамалар мен төсеніштердің биосәйкестілігін SEM әдісімен талдау нәтижелері 5-суретте көрсетілген.



5-сурет. 46 сағат бойы өсірілген егеуқұйрықтың сүйек кемігінен алынған мезенхималық дің жасушалары бар ГА қаптамасы жағылған титан имплантатының және газды-абразивтік өңдеуден өткен Ti6Al4V қорытпасының беттерінің SEM кескіндері
Ескерту – авторлар құрастырған

SEM-талдау гидроксипатитпен (ГА) қапталған және қапталмаған Ti6Al4V беттеріндегі жасушалардың морфологиясы мен бетпен өзара әрекеттесуінде айқын айырмашылықтар бар екенін көрсетті. ГА қаптамасы жағылған беттерде (5-суреттің сол жақ бағаны) жасушалар тығызорақ орналасқан, олардың жайылуы айқын байқалады, сондай-ақ филоподийлер мен жасушадан тыс матриктің кең көлемде түзілуі анықталды. Бұл жасушалардың бетке берік адгезиясын және төсенішпен белсенді өзара әрекеттесуін көрсетеді. Жақсы дамыған цитоплазмалық өсінділердің және жасушалар арасындағы көрінетін көпіршелердің болуы фокальды адгезиялардың қалыптасқанын және жасушалардың пролиферациясы үшін қолайлы ортаның түзілгенін көрсетеді. Бұл бақылаулар de Lima Cavalcanti et al. (2019) зерттеу нәтижелерімен сәйкес келеді, онда нанобөлшекті гидроксипатит беттерінде жасушалардың тұрақты өзара әрекеттесуі мен фокальды адгезиялардың қалыптасуы көрсетілген.

Керісінше, қапталмаған Ti6Al4V беттеріндегі жасушалар (5-суреттің оң жақ бағаны) сирегірек орналасқан, морфологиясы біркелкі емес және олардың жайылу дәрежесі төмен болды. Жасушаларда өсінділер саны аз және бетке бекінуі шектеулі болған, бұл адгезияның әлсіз екенін көрсетеді. Бұл Mishchenko et al. (2020) зерттеу нәтижелерімен сәйкес келеді:

авторлар ГА қаптамасы бар беттермен салыстырғанда қапталмаған металл беттерінде жасушалар тығыздығының төмен және олардың бағдарлануының ретсіз болғанын хабарлаған. Сонымен қатар, ГА беттерінде байқалған жасушалардың жақсырақ жайылуы мен бағдарлануы Martinez et al. (2018) еңбектеріндегі нәтижелермен де сәйкес келеді. Аталған зерттеуде кәдімгі қышқылдық өңдеуден өткен титан беттерімен салыстырғанда нано-гидроксипатит беттерінде жасушалардың морфологиялық бейімделуінің жоғары екені көрсетілген. Жалпы алғанда, бұл нәтижелер гидроксипатит қаптамалары жасушалардың бастапқы адгезиясын жақсартып қана қоймай, сонымен қатар цитоскелеттің ұйымдасуына және жасушалардың бетпен интеграциялануына ықпал ететінін көрсетеді. Бұл қасиеттер имплантат материалдарының ұзақ мерзімді тиімділігі үшін аса маңызды.

Осылайша, зерттеу нәтижелері таңдалған МПБ параметрлерінің биосәйкестілігі қолайлы және бактерияға қарсы жеткілікті төзімділігі бар қаптамаларды қалыптастыруда тиімді болғанын көрсетеді. Алайда қаптаманың микробқа қарсы қасиеттерін одан әрі жетілдіруге бағытталған оңтайландыру имплантаттардың ұзақ мерзімді пайдалану тиімділігі мен қауіпсіздігін едәуір арттыруы мүмкін. Болашақ зерттеулерде қаптама матрицасындағы бактерияға қарсы агенттердің оңтайлы концентрациясы мен таралуын зерттеу қажет. Бұл ретте бактерияларға төзімділіктің жоғарылауы қаптаманың механикалық беріктігі мен биосәйкестілігіне кері әсер етпеуі тиіс. Сонымен қатар, ГА қаптамасы бар имплантаттардың ұзақ мерзімді клиникалық тиімділігін растау және олардың сүйек регенерациясы мен васкуляризациясына әсерін бағалау үшін болашақта *in vivo* зерттеулер жүргізу аса маңызды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері роботтандырылған әдіспен жағылған ГА қаптамалары жасушалардың адгезиясы, пролиферациясы және дифференциациясы үшін қолайлы орта қалыптастыратынын көрсетті. Осыған байланысты оларды 3D-басып шығару әдісімен дайындалған титан эндопротездеріне арналған перспективалы қаптама ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Жасушалық адгезияның жақсаруы, остеогендік дифференциацияның артуы, ангиогенездің жақсаруы және бактерияға қарсы белсенділіктің жоғарылауы сияқты артықшылықтардың жиынтығы мұндай қаптамалардың имплантаттың тіндермен интеграциясын едәуір жақсартуға, оссеоинтеграция үдерісін жеделдетуге және имплантаттың қабылданбауы мен істен шығу қаупін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Алынған нәтижелер гидроксипатиттің биобелсенді қасиеттері жасушалардың имплантат бетіне адгезиясы мен пролиферациясын ынталандыратынын және Ti6Al4V қорытпасымен салыстырғанда тиімді оссеоинтеграция үшін қолайлы жағдай қалыптастыратынын айғақтайды.

Сонымен қатар, роботтандырылған МПБ бақыланатын қалыңдық пен кеуектілікке ие биобелсенді ГА қаптамаларын жағудың тиімді әдісі екені және олардың биомедициналық қолдануға жарамдылығын қамтамасыз ететіні анықталды. Күрделі геометриялық пішінді имплантаттардың бетіне жоғары қайталанымдылықпен жағу мүмкіндігі бұл технологияның пациенттің жеке ерекшеліктеріне бейімделген ортопедиялық шешімдерді әзірлеудегі жоғары әлеуетін көрсетеді.

Роботтандырылған МПБ технологиясын биомедициналық өндіріс үдерістеріне интеграциялау медицина, беткі қабатты инженериялау және роботтандырылған өндіріс салаларындағы елеулі жетістік болып табылады және имплантаттардың беткі қабатын модификациялаудың жаңа буынын дамытуға негіз қалайды. Бұл тәсіл имплантаттардың функционалдық сипаттамаларын жақсартып қана қоймай, пациенттерді емдеу нәтижелерін жақсартуға ықпал етеді және ортопедиялық қолданбалар үшін сенімділігі мен биосәйкестілігі жоғары шешім ұсынады.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды (BR24992854 гранты «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия саласының тұрақты дамуын қамтамасыз етуге арналған бәсекеге қабілетті ғылыми негізделген технологияларды әзірлеу және іске асыру»).

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ (IRB) МАҚҰЛДАУЫ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы зерттеу қолданыстағы институционалдық және ұлттық этикалық стандарттарға сәйкес жүргізілді. Зерттеу тек техникалық сипатта болған және адамдардың немесе жануарлардың қатысуын қамтымағандықтан, бұл бөлім «Қолданылмайды» деп белгіленеді.

АҚПАРАТТАНДЫРЫЛҒАН КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: «Қолданылмайды».

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректер негізделген сұрау салу бойынша корреспондент-автордан ұсынылуы мүмкін.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Ғылыми мақалалардың авторлары өз еңбектерін дайындау барысында жасанды интеллект (ЖИ) құралдарын қолданбады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Abir, M.M.M., Otsuka, Y., Ohnuma, K., Miyashita, Y. (2022). Effects of composition of hydroxyapatite/gray titania coating fabricated by suspension plasma spraying on mechanical and antibacterial properties. *J Mech Behav Biomed.* 125, 104888. doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104888
- Alontseva, D., Abilev, M., Zhilkashinova, A., Voinarovych, S., Kyslytsia, O., Ghassemieh, E., Russakova, A., Łatka, L. (2018). Optimization of Hydroxyapatite Synthesis and Microplasma Spraying of Porous Coatings onto Titanium Implants. *Adv. Mater. Sci.* 79–94. https://doi.org/10.1515/adms-2017-0043
- Alontseva, D., Azamatov, B., Safarova (Yantsen), Y., Voinarovych, S., Nazenova, G. A. (2023). Brief Review of Current Trends in the Additive Manufacturing of Orthopedic Implants with Thermal Plasma-Sprayed Coatings to Improve the Implant Surface Biocompatibility. *Coatings.* 13, 1175. https://doi.org/10.3390/coatings13071175
- Alontseva, D., Safarova (Yantsen), Y., Voinarovych, S., Obrosof, A., Yamanoglu, R., Khoshnaw, F., Nessipbekova, A., Syzdykova, A., Yavuz, H.I., Kaliuzhnyi, S., Krasavin, A., Azamatov, B., Khozhanov, A., Olzhayev, F., Weiß, S. (2025). Microplasma-Sprayed Titanium and Hydroxyapatite Coatings on Ti6Al4V Alloy: in vitro Biocompatibility and Corrosion Resistance: Part I. Microplasma spraying process coatings with varying porosity and surface roughness. *Johns. Matthey technol. rev.* 69 (1), 45 – 58. https://doi.org/10.1595/205651325X17201903387613
- Asghari Adib, A., Sheikhi, A., Shahhoseini, M, Simeunović A., Wang, S., Castro, C., Zhao, R., Khademhosseini, A., Hoelzle, D.J. (2020). Direct-write biofabrication and characterization of a GelMA-based biomaterial for intracorporeal additive manufacturing of tissue engineering scaffolds. *Biofabrication* 12(4), 045006. DOI 10.1088/1758-5090/adb7c3
- Bikmeyer, A. T., Bilialov, A. R., Li, W., Vairis, A. (2025). Cold spraying hydroxyapatite: a systematic review. *Welding International*, 1–11. https://doi.org/10.1080/09507116.2025.2466756.
- Blum, M., Sayed, M., Mahmoud, E.M., Killinger, A., Gadow, R., Naga, S.M. (2021). In vitro evaluation of biologically derived hydroxyapatite coatings manufactured by high velocity suspension spraying. *J Therm Spray Techn.* 30(7), 1891-1904. DOI:10.1007/s11666-021-01265-0

- de Lima Cavalcanti, J. H., Matos, P. C., Depes de Gouvêa, C. V., Carvalho, W., Calvo-Guirado, J. L., Aragonese, J. M., Pérez-Díaz, L., & Gehrke, S. A. (2019). In Vitro Assessment of the Functional Dynamics of Titanium with Surface Coating of Hydroxyapatite Nanoparticles. *Materials*, 12(5), 840. <https://doi.org/10.3390/ma12050840>
- Dorozhkin, S.V. (2024). Calcium Orthophosphate (CaPO₄) Containing Composites for Biomedical Applications: Formulations, Properties, and Applications. *J. Compos. Sci.* 8, 218. <https://doi.org/10.3390/jcs8060218>
- Implants for Surgery. Hydroxyapatite – Thermally Sprayed Coatings of Hydroxyapatite' (2018). BS ISO 13779-2:2018 – TC, British Standards Institution, London, UK.
- Kussaiyn-Murat, A., Kadyroldina, A., Krasavin, A., Tolykbayeva, M., Orazova, A., Nazanova, G., Krak, I., Haidegger, T., Alontseva, D. (2025). Application of Discrete Exterior Calculus Methods for the Path Planning of a Manipulator Performing Thermal Plasma Spraying of Coatings. *Sensors* 25(3), 708. <https://doi.org/10.3390/s25030708>
- Redhwi, I., Fallatah, F., Alshabona, F. (2024). Hydroxyapatite: A Comprehensive Review of Its Properties, Applications, and Future Trends. *International Journal of Biomedical Materials Research* 12 (1), 1-6. <https://doi.org/10.11648/j.ijbmr.20241201.11>.
- Liu, C., Xu, M., Wang, Y., Yin, Q., Hu, J., Chen, H., Sun, Z., Liu, Ch., Li, X., Zhou, W., Liu, H. (2024). Exploring the potential of hydroxyapatite-based materials in biomedicine: A comprehensive review. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 161, 100870. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100870>.
- Martinez, E. F., Ishikawa, G. J., de Lemos, A. B., Barbosa Bezerra, F. J., Sperandio, M., & Napimoga, M. H. (2018). Evaluation of a Titanium Surface Treated with Hydroxyapatite Nanocrystals on Osteoblastic Cell Behavior: An In Vitro Study. *The International journal of oral & maxillofacial implants*, 33(3), 597–602. <https://doi.org/10.11607/jomi.5887>
- Mishchenko, O., Solodovnyk, O., Deineka, V., Oleshko, O. (2020). Cellular response (osteoblasts and fibroblasts) depending on the type of surface of dental implants. *Morphologia*, 14 (1), 42–49. <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2020.1.42-49>
- Nicholson, J.W. (2020). Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. *Prosthesis* 2, 100–16. <https://doi.org/10.3390/prosthesis2020011>
- Pandey, A., Awasthi, A., Saxena, K.K. (2020). Metallic implants with properties and latest production techniques: a review. *Adv Mater Process Technol.* 6, 167–202. DOI:10.1080/2374068X.2020.1731236
- Phagare, M.: Hydroxyapatite Market Report 2025 (Global Edition). CONFERENCE 2024, Report ID: CRM 811253, p.250 (Global Edition). <https://www.cognitivemarketresearch.com/hydroxyapatite-coating-market-report>
- Prasad, C.D., Tiwari, A., Suryawanshi, S.R. et al. (2025). Overview of thermal spray coating on additive manufacturing. *Prog Addit Manuf* 10, 4327–4347. <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00869-6>.
- Vijayan, A., Vishnu J., Revathi, A., Shankar, B., Sambhudevan, S. (2025). A review on hydroxyapatite fabrication: from powders to additive manufactured scaffolds. *Biomater. Sci.*, 13, 913–945. <https://doi.org/10.1039/D4BM00972J>.
- Vilardell, A. M., Cinca, N., Garcia-Giralt, N., Dosta, S., Cano, I. G., Nogués, X., & Guilemany, J. M. (2018). Functionalized coatings by cold spray: An in vitro study of micro- and nanocrystalline hydroxyapatite compared to porous titanium. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications*, 87, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.02.009>
- Wan, L., Cui, B., Wang, L. (2024). A review on preparation raw materials, synthesis methods, and modifications of hydroxyapatite as well as their environmental applications. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 38, 101447. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101447>.

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Алонцева Дарья Львовна – Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Алонцева Дарья Львовна – доктор физико-математических наук, профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Darya L. Alontseva – Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: dalontseva@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1472-0685>



Азаматов Багдат Нурланович – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Азаматов Багдат Нурланович – доктор PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Bagdat N. Azamatov – PhD in Automation and Control, Associated Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: bazamatov@ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6381-5846>



Сафарова Юлия Ивановна – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, National Laboratory Astana, Nazarbayev University, г.Астана, Казахстан

Сафарова Юлия Ивановна – доктор PhD, ассоциированный профессор, National Laboratory Astana, Nazarbayev University, г.Астана, Казахстан

Yuliya I. Safarova – PhD, Associated Professor, National Laboratory Astana, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

e-mail: yantsen@nu.edu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0695-0413>



Сергей Войнарович – техника ғылымдарының кандидаты, аға ғылыми қызметкер, «Қатты фазалы дәнекерлеу және бет инженериясы» бөлімінің меңгерушісі, Е.О. Патон атындағы электрмен дәнекерлеу институты, г. Киев, Украина

Сергей Войнарович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом «Твердое фазное сваривание и инженерия поверхности», Институт электросварки имени Е.О. Патона, Киев, Украина.

Sergii Voinarovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Solid-State Welding and Surface Engineering, E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv, Ukraine.

e-mail: serge.voy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4329-9255>