



АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2022_3_29
MPHTI 50.47; 55.30.51; 76.09

Б.Н. Азаматов¹, Д.Л. Алонцева², А.Р. Хожанов³, Ж.К. Азаматова⁴

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

¹E-mail: azamatovy@mail.ru*

²E-mail: dalontseva@ektu.kz

³E-mail: alexsktl@mail.ru

⁴E-mail: zhanerkeaz@mail.ru

ЖАБЫНДЫЛАРЫ БАР МЕТАЛДЫ ОРТОПЕДИЯЛЫҚ ИМПЛАНТАНТТАР ӨНДІРІСІНІҢ АДДИТИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ: ШОЛУ

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ С ПОКРЫТИЯМИ: ОБЗОР

ADDITIVE MANUFACTURING OF COATED METAL ORTHOPEDIC IMPLANTS: A REVIEW

Аңдатпа. Қазіргі уақытта бүкіл әлемде медициналық импланттарды өндіру технологияларын өзірлеу және жетілдіру проблемалары өткір тұр, өйткені халықтың денсаулығы қоғам дамуының басты басымдығы болып табылады. Бұл шолу мақаласының мақсаты ортопедиялық импланттар өндірісінің негізгі ғылыми үрдістерін ұсынатын заманауи әдеби ашық көздерден алынған ақпаратты сыни талдау болды, адам ағзасына жақсы бітетін импланттардың жасау үшін негізгі проблемалар мен оларды шешу жолдарын анықтады. Мақалада импланттар мен олардың жабындарын жасау үшін металл және керамикалық биосәйкес материалдарды қолданудың заманауи тенденциялары талданады, материалды, композицияны, кеуектілікті, жабынның кедір-бұдырлығын ғылыми негіздеу қажеттілігі туралы қорытынды жасалады. Соңғы жылдары ортопедия саласында аддитивті өндірісті қолдану едәуір артты. Ортопедиялық импланттарды жасау үшін осы үрдісті қолданудың артықшылықтары мен қиындықтары көрсетілген. Тағы бір өзекті тренд импланттың бетіне көп қабатты биоүйлесімді жабындарды термиялық плазмалық тозаңдату, сондай-ақ тозаңдату процесін роботтандыру болып табылатыны көрсетілген. Осы екі тәсіл жиынтықта организм қабылдамайтын және пациенттің сауығу уақытын қысқартуға көмектесетін, беттің биожетімділігі жақсартылған қасиеттері бар пациентке тән металл импланттарды алу проблемасын шешуге мүмкіндік береді деген қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: Аддитивті өндіріс (АМ); биосәйкестік; ортопедиялық импланттар; роботтандырылған микроплазмалық тозаңдату (МПН).

Аннотация. В настоящее время во всем мире остро стоят проблемы разработки и совершенствования технологий производства медицинских имплантатов, так как здоровье населения – это основной приоритет развития общества. Целью данной обзорной статьи являлся критический анализ информации из современных литературных открытых источников, в которых представлены основные научные тренды производства ортопедических имплантатов, чтобы выявить основные проблемы и пути их решения для создания хорошо приживляющихся имплантатов. В статье проанализированы современные тенденции использования металлических и керамических биосовместимых материалов для создания имплантатов и их покрытий, сделаны выводы о необходимости научного обоснования выбора материала,

композиции, пористости, шероховатости покрытия. Показано, что в последние годы значительно увеличилось применение аддитивного производства в области ортопедии. Показаны достоинства и вызовы применения данного тренда для создания ортопедических имплантатов. Показано, что другим актуальным трендом является термическое плазменное напыление на поверхность имплантата многослойных биосовместимых покрытий, а также роботизация процесса напыления. Сделан вывод, что в совокупности, два этих подхода позволяют решить проблему получения пациентно-специфических металлических имплантатов с улучшенными свойствами биосовместимости поверхности, которые не будут отторгаться организмом и помогут сократить время выздоровления пациента.

Ключевые слова: Аддитивное производство (AM); биосовместимость; ортопедические имплантаты; роботизированное микроплазменное напыление (МПН).

Abstract. Currently, the problems of developing and improving technologies for the production of medical implants are acute all over the world, since the health of the population is the main priority of society. The purpose of this review article is to critically analyze the current scientific literature presenting the main scientific trends in the production of orthopedic implants, in order to identify the main challenges and find ways to improve the manufacturing of well-engrafted implants. The article analyzes current trends in the use of metal and ceramic biocompatible materials for medical implants and their coatings manufacturing, draws conclusions about the need for scientific rationale for the choice of material, composition, porosity, and roughness of the coating. It is shown that in recent years the use of additive manufacturing in the field of orthopedics has increased significantly. The advantages and challenges of applying this trend for orthopedic implants manufacturing are shown. It is shown that another current trend is thermal plasma spraying of multilayer biocompatible on the implant surface, as well as the spraying process robotization. It is concluded that together, these two approaches can solve the problem of obtaining patient-specific metal implants with improved surface biocompatibility that will not be rejected by the human body and will help to reduce the patient's recovery time.

Keywords: Additive manufacturing (AM); Orthopedics implants; Biocompatibility; Robotic Microplasma Spraying (MPS).

Kіpіcne. Қазіргі уақытта бүкіл әлемде медициналық импланттарды өндіру технологияларын әзірлеу және жетілдіру проблемалары өткір түр, өйткені халықтың денсаулығы қоғам дамуының басты басымдығы болып табылады. Сонымен бірге, мұндай әзірлемелерді ғылыми түрде негіздеу, негізгі тәсілдерді талдау, шешілмеген негізгі мәселелерді анықтау қажет етеді.

Осы шолу мақаласының мақсаты ортопедиялық импланттар өндірісінің негізгі ғылыми үрдістерін ұсынатын қазіргі заманғы әдеби ашық көздерден алынған ақпаратты сыни талдау болды, олардың негізгі проблемалары және имплантаттардың адам ағзасына жағсы бітуінің шешу жолдары, пациенттің сауығып кету уақытын қысқартып, әдеттегі өмір сүру деңгейін сақтауға көмектеседі.

Талдау үшін негізінен рецензияланған журналдардағы зерттеу мақалалары, сондай-ақ Еуропалық ортопедия және травматология қауымдастықтарының есептері мен мәлімдемелерін қамтитын сенімді ашық ақпарат көздері пайдаланылды.

Әдеби шолу. Адамның сүйек-буын аппаратының патологиясы адамдардың өмір сүру сапасына, жұмысқа қабілеттілігі мен денсаулық жағдайына әсер ететін қоғамның маңызды мәселелерінің бірі болып табылады. Қазіргі уақытта бүкіл әлемде халықтың денсаулығын қорғауға байланысты проблемаларды шешудің басым бағыты халықаралық сапа стандарттарына сәйкес келетін, бағасы бойынша қолжетімді медициналық имплантаттар өндірудің жоғары технологиялық бәсекеге қабілетті технологияларын әзірлеу болып табылады [1, 2]. Мұндай импланттар пациенттің сауығуын тездету, имплантантан бас тартуға байланысты операциядан кейінгі асқинулардың қаупін азайту және импланттың ұзақ өмір сүруін қамтамасыз ету үшін қажет [3-6].

EFORT (European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology)

еуропалық ортопедия және травматология ұлттық қауымдастықтары Федерациясының болжамдарына сәйкес [7] Еуроодақ (ЕО) елдерінде 2050 жылға қарай пациенттерге орнатылатын жамбас импланттарының абсолюттік саны 2015 жылмен салыстырғанда орта есеппен 50 %-ға өседі, тиісінше ревизиялар саны да өседі, яғни имплантатты бастапқы орнатудың операциядан кейінгі әр түрлі асқынуларына байланысты, жаңа имплант орнату қажет ететін қайталанатын оталар саны да өседі.

Имплантаттар санының қарқын өсуі және оларды OECD экономикалық ынтымақтастық және даму ұйымы елдерінде пайдалануы негізінен келесі онжылдықтарда АҚШ-тың қажеттіліктеріне байланысты болады, олардың үлесі 2015 жылы жамбас импланттарына 46% - ыз және 2050 жылы 56% тиесілі.

Бес ел (АҚШ, Франция, Германия, Италия, Ұлыбритания) қазір және болашақта имплант – эндопротез (жамбас және тізеге арналған) тұтынушылардың 75 % құрайды.

Бір таңқаларлығы, EFORT болжамдарына сәйкес [7, 8] жас пациенттерде эндопротездеу операцияларының өсу қарқыны егде жастағы пациенттерге қарағанда жоғары болады, сондықтан 64 жастан жас пациенттерде жамбас импланттары қондырғыларының 35% өсуі болжанады.

Бұл 2050 жылға қарай жамбас буынының эндопротездеу жағдайлары санының тек 16 %-ға ұлғаюы болжанатын 65 және одан жоғары жастағы пациенттер үшін болжам деректерімен қарама-қайшы келеді. Осылайша, сенімді бірлескен протездерге деген сұраныс жас және белсенді пациенттер үшін ыңғайлы жұмыс істеуі және өмір салтын ұстануы үшін салыстырмалы түрде жоғары болады.

Жас пациенттерде жамбас эндопротезін жиі қолдануға байланысты, бұл науқастарда қартаю және өсіп келе жатқан популяцияда қайта қарау ықтималдығы артады. Мысалы, Швециялық артропластика деректері бойынша [9] соңғы 4 онжылдықта ұзақ мерзімді перспективада (20-30 жыл) жамбас артропластикасында алғашқы имплантация кезінде жасқа байланысты қайта қарау жиілігі 20 %-дан 40 %-ға дейін болатындығын көрсетеді. 2050 жылы бұл мән орташа есеппен 23 %-дан 26 %-ға дейін болады деп күтілуде, бұл өте консервативті болып көрінеді және болашақта эндопротездерге деген қажеттілікті бағаламайды.

Ұлттық регистрлердің бірқатар есептерінде жамбас және тізе эндопротездерінің істен шығуы бойынша деректер келтірілген (уақыт өте келе ревизиялардың жиынтық коэффициенті). Сонымен, SIRIS (Swiss National Hip & Knee Joint Registry) есебінде [9] алты жыл бойы бақылау кезеңінде осы топ үшін жиынтық тексеру деңгейі жамбас буыны үшін төрт пайызға және тізе буыны үшін алты пайызға жақындағанын көрсетті. Екі түрлі буындар бойынша уақыт өте гелі қайта қарау санының тұрақты өсуі байқалды.

Айта кету керек, бұл статистикаға Азия, Оңтүстік Америка және Таяу Шығыс елдерінің эндопротезге қажеттіліктері кірмеген, бірақ протездеуге деген қажеттілік өте үлкен және тексеру импланттарына деген қажеттіліктің өсу тенденциясы, сондай – ақ эндопротездеу операцияларының «жасару» тенденциясы еуропалық есептерде байқалғанға ұқсас [7-9]. Осы мақалада OCED елдерінің қажеттіліктерін талдауға назар аударылады, бұл бүкіл әлемде ортопедиялық импланттарды өндірудің жаңа тәсілдерін іздеудің өзектілігін көрсетеді. EFORT [7, 8] келтірген деректер бойынша көптеген елдер болашақта күрделі міндеттерді шешуге тура келетінін көрсетеді. Көптеген елдердегі халықтың қартаюына және жастарда буындардың бастапқы өзгеруінің жоғары қарқынына байланысты, ревизия саны орташа деңгейден жоғары болуы мүмкін. Мұндай басқарылмайтын процесс осы елдердің денсаулық сақтау жүйесіндегі бірқатар проблемаларға әкелуі мүмкін, мысалы, күту уақыты мен баға қысымының жоғарылауы және, пациенттер үшін қаржылық шығындардың артуымен операцияларға қол жетімділік шектеулерге әкеледі. Сондықтан,

бір жағынан, консервативті (хирургиялық емес) процедуралармен емделетін пациенттерге сәйкес келмейтін операциялардың санын азайту үшін, екінші жағынан, имплантаттардың қызмет ету мерзімін ұзарту және операциядан кейінгі асқинулардың санын азайту мақсатында эндопротездің де, эндопротездеу процедураларының да сапасын жақсарту үшін тиісті шараларды уақтылы қабылдау қажет.

Осыған байланысты ортопедиялық импланттарды өндірудің қазіргі озық технологиялары үнемі жетілдіріліп отырады. Протездердің өнімділігі мен биожетімділігі трибологиялық зерттеулер, топографиялық құрылымдар және электрохимиялық беттік модификациялар сияқты дәстүрлі тәсілдермен жақсарып келе жатқанда, қазіргі уақытта жаңа тәсілдер әзірленуде. Оларға, бірінші кезекте, пациенттің бір циклінде арнайы имплантаттар жасау үшін аддитивті өндірістерді қолдану, жаңа инновациялық биосәйкес жабындарды әзірлеу және ілеспе технологиялық процестерді автоматтандыру жатады.

Аддитивті өндіріс – бұл автоматтандырылған жобалау (АЖЖ) моделі бойынша 3D-модельді дайындау үшін ұнтақ, пластик немесе металл сияқты материалдар қабат-қабат жағылатын өндіріс технологиясының түрі [10]. Бұл әдіс дәстүрлі өндіріс технологиясынан ерекшеленеді, мысалы, имплантты СББ машинасына өндеу кезінде материалды алып тастаудың орнына, материалдарды қабат-қабатпен қосады. Аддитивті өндіріс (АӨ) – бұл бөлшектердің сандық ақпаратты бойынша, яғни CAD 3D модель бойынша, заттарды қабаттарға салу үшін материалдарды іріктеп қосу процесі деп айта аламыз. Бұл анықтамада аддитивті өндіріс АМ процесі және жоғарыда аталған дәстүрлі метал жону процесі (CNC станогы), қалыптау процестері (соғу) және көлемді қатайту процестері (мысалы, құю) сияқты дәстүрлі өндіріс әдістерінің арасындағы түбегейлі айырмашылықты көрсетеді [11]. Аддитивті өндірісті көбінесе 3D баспа деп, аддитивті процестер деп, еркін пішінді өндіріс және көп деңгейлі өндіріс деп аталады.

Аддитивті өндіріс ортопедия саласында анағұрлым құнды жеке протездер мен имплантаттарды жасауды жеңілдетеді. Бұл технология кез-келген түрдегі импланттарды тез жасауға мүмкіндік береді, сонымен қатар бақыланатын мөлшері бар кеуектердің микропорлы құрылымдарды өндіру үшін қолданылады. Дәстүрлі процестермен салыстырғанда, АӨ өте күрделі өнімдердің шағын партияларын (бір-бірден бірнеше) үнемді өндірудің ерекше артықшылықтарын ұсынады, жоғары өнімділікке ие және жаппай және жеке медициналық өндіріс үшін қалдықтардың ең аз мөлшерін береді [12]. Алайда, аддитивті өндіріс технологиясының құны өте жоғары және бағдарламалық жасақтаманы, жабдықты, жұмыс істеуге, қызмет көрсетуге арналған білікті адами ресурстарды, сондай-ақ басып шығарылатын материалдардың құнын қамтиды. АӨ құны жоғары импланттарды жасайды, сонымен қатар үлкен жобалау шығындарын талап етеді. Бұл технологияның тағы бір шектеулігі-уақыт шкаласында физикалық модель құру. Бұл модельдің күрделілігі мен өлшеміне байланысты айнымалы мән [10, 11].

Алайда, АӨ дизайнға және/немесе материалға байланысты құралдарды қажет етпейтіндіктен, АӨ жаңа буын ортопедиялық импланттарын жасауға және өндіруге тамаша үміткер болып табылады [10-12]. АӨ ортопедия саласында икемді шешім ұсынады, онда жеке имплантаттар қажетті пішін мен мөлшерге сәйкес құрылуы мүмкін. Осы технологиямен жасалған үш өлшемді модель науқастың анатомиясы туралы нақты түсінік береді. Сонымен, АӨ технологиясы арқылы оңай қол жеткізуге болатын дизайн еркіндігі сүйектерді өсіру және имплантатты биологиялық бекіту үшін кеуекті құрылымдарды қолдануға мүмкіндік береді. Бекітудің сенімді болуы және имплантантан бас тартпау үшін өндіріс технологияларын таңдауға да, имплант жасау үшін материалдарды таңдауға да жаңа тәсілдер қажет.

Науқастың эндопротезден бас тартуының себептерінің бірі – сүйек некрозы, ол импланттың беті сынған, деформацияланған және металл бөлшектері дененің айналасындағы тіндерге енген кезде немесе перипротездік бактериялық инфекциялардың дамуына байланысты пайда болады. Осы себептер қазіргі заманауи импланттарды қолдануды шектейді [13-15]. Сондықтан ғалымдар мен өндіріс мамандарының басты назарында медициналық импланттардың биожетімділігін арттыру үшін олардың бетін өңдеудің жаңа технологияларын жасау жатыр, яғни, осы биологиялық ортада импланттың нақты қызметіне қолайлы жауап беретін имплант материалының қасиеттері. Импланттың беті имплантат адам ағзасына орнатылған кезде тірі тінмен бірінші болып байланысады, сондықтан тірі ұлпаның имплант материалына алғашқы реакциясы оның бетінің қасиеттеріне байланысты болады.

Импланттың бетін өңдеу оның улы емес және бактерияға қарсы қасиеттерін қамтамасыз етуі керек, сонымен бірге имплант пациенттің қалпына келу уақытын қысқартып, импланттың қызмет ету мерзімін ұзарту үшін остеокондуктивтілік пен остеоинтеграцияны қамтамасыз етуі керек [16, 17]. Мұндағы негізгі міндет-бақыланатын құрамы, микроқұрылымы және беткі морфологиясы бар жабынды жасау, ол бетінің био-үйлесімділігінің қажетті қасиеттерін қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, биожетімділік тұжырымдамасы екіұштылыққа ие [2, 17-19], жабындардың жаңа түрлері үшін, мысалы, көп қабатты жабындар үшін танылған сапа стандарттары жоқ және жаңа эзірлемелердің сәттілігін растау үшін сынақтар қажет. Мысалы, медициналық имплантаттар мен жабындарға арналған ISO стандарттарына кеуектілік және бетінің кедір-бұдырлығы сияқты маңызды талаптар әлі енгізілген жоқ, өйткені бұл қарқынды жаңа зерттеулер мен пікірталастар мәселесі.

Өзгертуге болатын ортопедиялық және дентальды имплантаттар бетінің маңызды қасиеттерінің бірі-импланттың беткі қабаттарының кеуектілігі. Саңылаулардың орташа мөлшерінің, көлемді кеуектіліктің, қалыңдығының және әртүрлі материалдардан жасалған биосәйкес жабындардың басқа параметрлерінің имплантаттардың остеоинтеграциясына әсерін бірқатар зерттеулер қалың (50 мкм-ден 700 мкм-ге дейін) кеуекті жабындарды пайдалану сүйек тіндерімен жанасу аймағын ұлғайту арқылы имплантаттың тіндерде сенімді бекітілуін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретінін көрсетті [6, 19-22]. Мұндай жабындар сүйек тәрізді құрылымға ие, бұл сүйек тінінің имплантаттың тесіктеріне енуіне мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта зерттеушілер имплант үшін тері тесігінің оңтайлы мөлшері мен кеуектіліктің нақты мөлшері (%) туралы келіспейді. Тумилович М. В. және басқалары [21] іргелес сүйек тіндеріне титан ұнтағының кеуекті жабыны бар цилиндрлік импланттардың адгезиясының беріктігін анықтау үшін зертханалық жануарларды зерттеудің кейбір мәліметтерін ұсынды. 2-3 айдан кейін ығысу күші 100 мкм-ден 300 мкм-ге дейінгі тері тесігі өлшемдерінің диапазонында 26-27 МПа-ға жетеді, ал үлкен тері тесігі кезінде сүйектің имплантатқа адгезиясы төмендейді. Калита В.И. және т.б. [19, 20] титан және гидроксипатит жабыны бар сүйек ішіне орнатылатын импланттардың жануарларында (иттерде) остеоинтеграция туралы эксперименттік мәліметтерді ұсынды, олардың ашық тері тесігінің мөлшері 300 мкм-ден 500 мкм-ге дейін сүйек тінінің тиімді интеграциясы үшін оңтайлы болып табылады. Лю В. және т.б. [6] эндопротез импланттары материалдарында әртүрлі мөлшердегі (20 мкм-ден 100 мкм-ден астам диапазонда) кеуектердің болуын қамтамасыз ету ұсынылады; бұл ретте кеуектер өзара жалғануы тиіс. Матасси Ф. және басқалар [22] титан үлгілеріндегі 100-200 мкм тері тесігінің мөлшері 355-500 мкм немесе толығымен тығыз үлгілермен салыстырғанда жасуша адгезиясын ынталандыру және бактерияға қарсы қасиеттерді арттыру үшін жақсы екенін көрсетті. Имплантаттың

(жабынның) беткі қабаттарының қажетті кеуектілік диапазондарын авторлар [19-22] 15 %-дан 35 %-ға дейінгі диапазонда көрсетеді.

Имплантат бетінің кедір-бұдырлығы жасушалар мен тіндердің реакциясына да әсер етеді, жоғары кедір-бұдырлық имплантат бетінің сүйекке жақын ауданын және сәйкесінше ондағы остеобласттардың санын көбейтеді, осылайша импланттың сүйекке бекітілуін жақсартады [23, 24]. Бұл сүйекпен бірге өсетін бірлескен эндопротездер мен дентальды имплантаттар үшін қажет. Алайда, сынықты сәтті емдегеннен кейін түйреуіштерді, бұрандаларды немесе пластиналарды алып тастауға байланысты асқынуларды азайту үшін остеобласттардың бекітілуі, керісінше, имплантаттағы сүйектің одан әрі өсуін азайту үшін басылуы керек.

Имплантациядан кейін остеоинтеграция кезінде эндопротезде ақуыз қабаты түзіледі, ол оның бетін бактериялық колонизацияға және бактериялық биоқабаттардың өсуіне сезімтал етеді [13-15]. Грам-позитивті алтын стафилококктар мен эпидермальды стафилококктар тудыратын бактериялық инфекциялар имплантаттарда тұрақты биоқабаттармен түзеді, оларды антибиотиктермен жою қиын [15]. Имплант бетінің биожетімділігін арттыра отырып, буынды ауыстырғаннан кейін жиі кездесетін асқынулардың бірі болып табылатын перипротездік бактериялық инфекциялар тудыратын бактериялық биоқабаттардың пайда болуын қалай болдырмауға болады деген мәселені қатар шешу қажет.

Қазіргі уақытта клиникалық қолдануға жарамды жақсы көлемдік қасиеттері мен сипаттамалары бар имплант үшін био үйлесімді материалды таңдау туралы пікірталастар жалғасуда [2, 17, 18]. Жақында EFORT [8] ортопедиялық импланттардағы кобальт туралы мәлімдемесін еске түсіру жеткілікті, онда ЕО комиссиясы Еуропалық ЕСНА химиялық агенттігінен нұсқаулар алғаннан кейін, 1 жылдың 2021 қазанынан бастап медициналық құрылғылардағы кобальтқа қатысты алаңдаушылық деңгейін арттырады. Материалдарды таңдау сонымен қатар сәтті био үйлесімді жабынның негізгі параметрі болып табылады. Био үйлесімді жабындардың қабаттарын қалыптастыру үшін көптеген материалдарды, соның ішінде металдарды, керамиканы және полимерлерді қолдануға болады. Дегенмен, жабын процестерінің әртүрлілігі және материалдардың қасиеттері қолданылатын қабаттың ең жақсы құрамын таңдауда қиындықтар тудыруы мүмкін. Бастапқы материалдардың әрқайсысы биожетімділік қасиеттеріне ие болғанымен, олар әртүрлі балқу нүктелеріне, механикалық және химиялық қасиеттерге ие.

Осылайша, импланттарды өндірудің негізгі материалы әлі де титан қорытпалары болып табылады, импланттардың істен шығу деңгейі өте төмен (импланттардың 89 %-дан астамы 10 жылдан астам өмір сүреді) және бұл жағдай жақын болашақта жалғасуы мүмкін [2, 6, 18, 25]. Клиникалық тәжірибе көрсеткендей, металл импланттары қоршаған тіндерге металл иондарын босатып, адам ағзасында жергілікті коррозияға ұшырайды. Титан импланттарының беттерін жабатын оксид пленкаларының қасиеттері коррозияға және сәтті остеоинтеграцияға қарсы тұру үшін өте маңызды деп саналады, атап айтқанда сынған сүйек бөліктерінде [25, 26].

Соңғы уақытта цирконий (Zr), тантал (Ta) металдарын және олардың негізіндегі қорытпаларды медициналық импланттарға арналған материалдар ретінде пайдалануға қызығушылық артты [2, 26-30]. Мысалы, титан қорытпаларымен салыстырғанда цирконий қорытпалары биожетімділігі жақсырақ, олар биокоррозияға аз сезімтал және пациенттерде қабылдамау реакциясын аз тудырады [27, 29]. Кулкарни О. және Какандикар Ж. [30] сондай-ақ, биомедициналық мақсаттарда қолдануға арналған цирконий қорытпаларының бірегей қасиеттері, мысалы, ішкі сүйек тәрізді апатит қабатын қалыптастыру, сондай-ақ магниттік-резонанстық томография (МРТ) диагнозымен жақсы үйлесімділік пен төмен

магниттік сезімталдықпен өзара әрекеттесу. Жоғары беріктігі мен химиялық тұрақтылығына байланысты ZR және Ta ортопедиялық биоматериалдар ретінде өте перспективалы. Бұл материалдардың коррозияға төзімділігі салыстырмалы түрде қалың (шамамен 5 мкм) беткі оксид қабатының арқасында қол жеткізіледі, бірақ олар өндірісте қымбат және қазіргі уақытта негізінен металл аллергиясы (немесе, дәлірек айтқанда, металға жоғары сезімталдық) сияқты проблемалар туындаған ерекше жағдайларда сұранысқа ие [26]. Имплантант өндірісінің негізгі қиындықтары мен шығындары осы металдарды қалыптау мен өңдеуге байланысты.

Кальций фосфаты негізіндегі материалдардан жасалған жабындарды түрлі әдістермен қалыптастыру есебінен металл имплантанттар бетінің биосәйкес қасиеттерін арттыру саласындағы жетістіктерге бұрынғысынша тұрақты қызығушылық байқалады [31-34]. Гидроксиапатит (ГА) – сүтқоректілер сүйектерінің негізгі бейорганикалық құрамдас бөлігі, ол биосәйкестік және сүйек тінімен остеоинтеграция сияқты қасиеттерді қамтамасыз етеді. ГА жабындылары бар имплантанттар металдардың механикалық қасиеттерінің және кальций фосфаты негізіндегі биокерамикаға тән әртүрлі биофункциялардың перспективалы үйлесімін көрсетеді.

Баяу балқытын материалдарды пайдалану және импланттардың белгілі бір түрін жасау сынақтарына жауап селективті лазерлік балқыту және термиялық плазмалық бүрку технологияларын бейімдеу және жетілдіру болуы мүмкін [1, 35-40]. Селективті лазерлік балқыту (SLM) – металдарды аддитивті өндіру технологиялары арасында металл бөлшектерін өндірудің ең дәл әдістерінің бірі. Аддитивті технологияны қолдана отырып, имплантант компьютерлік дизайн мәліметтеріне сәйкес титан қорытпасының ұнтағын селективті бадқыту үшін қуатты лазерді қолдана отырып, қабат-қабат салынады. Кеуекті құрылымдар немесе терезелер сияқты күрделі геометриялық пішіндерді бір өндіріс кезеңінде жасауға болады. Бұл көптеген дизайн ерекшеліктері бар ерекше және ойластырылған геометриялық пішіндерді жобалау және өндіру мүмкіндігінің арқасында имплантанттардың құнын өндіруге кететін шығындар мен уақытты көбейтпестен арттыруға мүмкіндік береді. SLM баспа бөлшектері үшін жақсы сапалы бет пен жоғары ажыратымдылықты қамтамасыз етеді. SLM-мен өңдеуге болатын материалдарға Ti6Al4V (5 класс), Ti6Al4V ELI (23 класс), Ti-Nb-Ta қорытпалары және т.б. кіреді. Науқастарға арналған трабекулярлық (торлы) құрылымдар мен жеке имплантанттар – бұл дәстүрлі (субтрактивті, қалыптастырушы) өндірістік технологияларды қолдану арқылы шығару қиын күрделі геометриялық пішіндер. Адаптивті имплант – бұл пациенттің ерекше анатомиясына бейімдеу үшін медициналық құрылғының негізгі дизайнына масштабтау сияқты конвертті жобалау алгоритмін қолдануға қатысты термин.

Эндопротездердің биожетімділігін олардың бетіне жоғарыда аталған титаннан, цирконийден немесе танталдан газотермиялық плазмалық бүрку арқылы жабу арқылы жақсартуға болады. Термиялық плазмалық жабынның пайда болуы имплантанттың бетіне плазмалық ағында көп немесе аз еріген бөлшектердің көп мөлшерде түсіп, олардың арасында тесіктер пайда болады. Бұл жағдайда жабын бетінің кеуектілігі мен кедір-бұдырлығы оны құрайтын бөлшектердің мөлшеріне, жылдамдығына және балқу дәрежесіне байланысты болады [4]. Тесіктердің мөлшеріне жабын бөлшектерінің нақты мөлшері де, олардың пішіні де әсер етеді [21]. Жабындардың пайда болу механизмдерін түсіну жабынның қажетті микроқұрылымын алу үшін газ-термиялық плазмалық бүркудің нақты параметрлерін таңдауға мүмкіндік береді. Қазіргі уақытта газ-термиялық плазмалық бүрку әдістері металл өңдеу өнеркәсібіне қатысты қосымшаларда кеңінен қолданылады [41], бірақ биомедицина саласы үшін бұл қазіргі уақытта зерттеліп жатқан инновациялық

потенциал мәселесі [4, 41]. Осылайша, термиялық плазмалық бүрку-бұл баяу балқитын металдардан немесе олардың негізіндегі қорытпалардан жабындарды алудың қолайлы әдісі, бұл плазмалық ағынға материалдық бөлшектердің еруін қамтамасыз етеді, бірақ сонымен бірге имплантаттың бетін плазмалық ағынмен өңдеу оның көлемді қызуына әкелуі мүмкін, бұл салқындаған кезде импланттың деформациясын тудырады. Сондықтан медициналық импланттарға биосәйкес материалдардан жасалған термиялық плазмалық жабындылардың режимдерін таңдау импланттың бетіне қажетті қасиеттерді беру (биосәйкестікті арттыру), қызып кетуді болдырмау және сонымен бірге қымбат жабын материалдарын тиімді пайдалану үшін ғылыми негіздемені қажет етеді.

Бүгінгі күні шағын көлемдегі эндопротез импланттарына биосәйкес жабындарды газотермиялық плазмалық тозаңдатудың перспективалық әдістерінің бірі, мысалы, шынтақ буындарының бөлшектері, тіс импланттары сияқты микроплазмалық тозаңдату (МПТ) болып табылады. МПТ түрлі материалдардан жасалған субстраттарға ұнтақ және сым материалдарын жабуға мүмкіндік береді. 3 мм-ден 5 мм-ге дейінгі бүрку нүктесінің кішкентай диаметріне байланысты, МПТ-да тозаңдандырылған материалдың жоғалуы дәстүрлі жылу плазмалық бүркуге қарағанда едәуір аз. Микроплазмотрон қуатының аздығына байланысты мпн процесінің субстратқа термиялық әсері минималды болып табылады, бұл жұқа қабырғалы және шағын өлшемді бөлшектерге олардың деформациясы мен қызып кетуіне жабындар алуға мүмкіндік береді [1]. Сонымен қатар, МПТ металл эндопротездерде баяу балқитын және биосәйкес металдардан (Ta, Zr, Ta) және олардың негізіндегі қорытпалардан кеуекті жабындарды, сондай-ақ керамиканы (ГА) алуға мүмкіндік береді [42-45] бұл сонымен қатар сүйек тінінің оның жабынының тесіктеріне өнуі есебінен имплантаттың биосәйкестігін және екінші рет бекітілуін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеудің авторлары титан қорытпасынан жасалған ортопедиялық импланттарға титан мен гидроксипатиттен жасалған биосәйкес жабындарды сәтті МПТ тәжірибесі бар [42, 43], ал қазір имплантаттар бөлшектеріне цирконий сымнан және тантал сымнан жасалған роботталған МПТ жабындарының мүмкіндіктерін зерттеп жатыр [44, 45]. Пайдалану манипуляциялық жұмыс жаңа басқару алгоритмдерімен бірге өте перспективалы нәтижелер береді және дәл дәлдікпен бірқатар маңызды бүрку параметрлерін сақтауға мүмкіндік береді (плазмотронды жылжыту жылдамдығы және бүрку қашықтығы), осылайша жабынды тек бақыланатын қалыңдығымен ғана емес, сонымен қатар бақыланатын кеуектілікпен де алуға мүмкіндік береді [43].

Осылайша, имплант материалдарын таңдау және оларды алу технологиясы, имплант бетіндегі материалдар мен жабындардың құрамын таңдаумен бірге, биосәйкестікті анықтайтын бетінің кеуектілігі мен кедір-бұдырлығы мәселесі нақты технологиялық процестерге қатысты маңызды ғылыми және практикалық қызығушылық тудыратын әлемдік ғылыми зерттеулердің назарында. Ортопедиялық импланттар мен олардың жабындарын өндіру үшін неғұрлым перспективалы металдар титан, тантал, цирконий (және олардың негізіндегі қорытпалар), сондай – ақ гидроксипатит негізіндегі керамика болып табылады, ал неғұрлым перспективалы технологиялар-селективті лазерлік балқытуды және қабатты плазмалық тозаңдатуды қоса алғанда, жабындары бар пациентке бағдарланған импланттарды аддитивті өндіру технологиялары болып табылады.

Қорытынды. Қазіргі заманғы әдебиеттерге шолу қоғамның ортопедиялық импланттарға деген өсіп келе жатқан қажеттіліктерін көрсетті және адам ағзасына жақсы енген импланттарды өндірудің негізгі тәсілдері мен шешілмеген мәселелерін анықтауға мүмкіндік берді. Аддитивті өндіріс (тер) әлемдік тренд болып табылады. АӨ кеуекті беті бар жеке дизайнға импланттарды жасауға, яғни пациент үшін ең жақсы нұсқаны

ұсынатын сапалы өнімдер жасауға мүмкіндік береді. Тағы бір үрдіс имплантаттың бетіне бақыланатын құрылымы мен қасиеттері бар, композицияның ғылыми негіздемесі, жабынның кеуектілігі, кедір-бұдырлығы және бүркудің технологиялық параметрлерін таңдауы, сондай-ақ бүрку процесін роботтандыру бар көп қабатты биоүйлесімді жабындарды термиялық плазмалық бүрку болып табылады. Осы екі тәсіл жиынтықта ағзаның қабылдамауына жол бермейтін және пациенттің сауығу уақытын қысқартуға көмектесетін, бетінің биосәйкестігі жақсартылған қасиеттері бар пациентке тән металл импланттарды алу проблемасын шешуге мүмкіндік береді.

Алғыс айту. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № AP13268737).

References

1. Hassanen, J., Tunde, K. (2019). Selective laser melting of Ti alloys and hydroxyapatite for tissue engineering: progress and challenges. *Mater Res Express*, (6):082003.
2. 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.
3. Saini, M., Singh, Y., Arora, P., Arora, V., Jain, K. (2015). Implant biomaterials: A comprehensive review. *World J Clin Cases*, (3), 52-57.
4. Cizek, J., Matejicek, J. (2018). Medicine Meets Thermal Spray Technology: A Review of Patents. *J Therm Spray Tech*, 27(8), 1251-1279.
5. Civantos, A., Dominguez, C., Pino, R.J., Setti, G., Pavon, J.J., Martinez-Campos, E., Garcia, F.J.G., Rodriguez, J.A., Allain, J.P., Torres, Y. (2019). Designing bioactive porous titanium interfaces to balance mechanical properties and in vitro cells behavior towards increased osseointegration. *Surf Coat Technol*, (368), 162-174.
6. Liu, W., Liu, S., Wang, L. (2019). Surface Modification of Biomedical Titanium Alloy: Micromorphology, Microstructure Evolution and Biomedical Applications. *Coatings*, (9), 249.
7. Pabinger, C., Lothaller, H., Portner, N., Geissler, A. (2018). Projections of hip arthroplasty in OECD countries up to 2050 *HIP International*, 28(5), 498-506. <https://doi.org/10.1177/1120700018757940>
8. EFORT Statement on Cobalt in Orthopaedic implants Update from the earlier Joint Statement of EFORT and MedTech Europe's Orthopaedic Sector Group 14 August 2018 https://www.efort.org/wp-content/uploads/2021/08/Update_joint_statement_EFORT_MedTech_Cobalt_24082021.pdf Accessed 17 January 2021
9. Swiss National Hip & Knee Joint Registry Report 2021, Annual Report of the SIRIS Registry Hip & Knee, 2012-2020 https://www.swiss-medtech.ch/sites/default/files/2021-12/211130_SIRIS-Report%202021_online.pdf , Accessed 17 January 2021
10. Tilton, M., Lewis, G. S., Manogharan, G. P. (2018). Additive Manufacturing of Orthopedic Implants: Progress in Biology, Manufacturing, and Industry Perspectives In book: *Orthopedic Biomaterials: Springer International Publishing AG*, 21-53. DOI: 10.1007/978-3-319-89542-0_2
11. Javaid, M., Haleem, A. (2018). Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review. *Journal of clinical orthopaedics and trauma*, 9(3), 202–206. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.04.008>
12. Zeidler, S. (2020). Additive Manufacturing in Orthopedics. <https://www.sme.org/technologies/articles/2020/may/additive-manufacturing-in-orthopedics/>
13. Zhao, L.; Chu, P.K.; Zhang, Y.; Wu, Z. (2009). Antibacterial coatings on titanium implants. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 91, 470-480.
14. Campoccia, D., Montanaro, L., Arciola, C.R. (2006). The significance of infection related to orthopedic devices and issues of antibiotic resistance. *Biomaterials*, (27), 2331-9.
15. Ribeiro, M., Monteiro, F.J., Ferraz, M.P. (2012). Infection of orthopedic implants with emphasis on bacterial adhesion process and techniques used in studying bacterial-material interactions. *Biomater*, (2), 176-194.
16. Murr, L.E. (2019). Strategies for creating living, additively manufactured, open-cellular metal and alloy implants by promoting osseointegration, osteoinduction and vascularization: An overview. *J Mater Sci Technol*, (35), 231-241.
17. John, A.A., Jaganathan, S.K., Supriyanto, E., Manikandan, A. (2016). Surface modification of titanium and its alloys for the enhancement of osseointegration in orthopaedics. *Curr Sci*, (111), 1003-1015.

18. Wilson, J. (2018). Metallic biomaterials: State of the art and new challenges. In *Fundamental Biomaterials: Metals*. Woodhead Publishing Series in Biomaterials; Woodhead Publishing: Shaston, UK, 1-33.
19. Kalita, V.I. et al. (2020). Plasma Spraying for Additive Preparation Technology of 3D Bioactive Coatings with a New Type of Porous Ridge. Cavity Structure SSRN Electronic Journal, DOI: 10.2139/ssrn.3702819
20. Kalita, V.I., Malanin, D.A., Mamaev, A.I., Mamaeva, V.A., Novochadov, V.V., Komlev, D.I., Komlev, V.S., Radyuk, A.A. (2021). 3D bioactive coatings with a new type of porous ridge/cavity structure. *Materialia*, (15). DOI:10.1016/j.mta.2021.101018
21. Tumilovich, M.V., Savich, V.V., Shelukhina, A.I. (2016). The effect of particle shape and size on the osseointegration of porous titanium powder implants. *Doklady BGUIR*, 7(101), 115 – 119. In Russian.
22. Matassi, F., Botti, A., Sirleo, L., Carulli, C., Innocenti, M. (2013). Porous metal for orthopedics implants. *Clin Cases Miner Bone Metab*, (10:2), 111-115. PMID: 24133527
23. Civantos, A., Beltrán, A.M., Domínguez-Trujillo, C., Garvi, M.D., Lebrato, J., Rodríguez-Ortiz, J.A., García-Moreno, F., Cauich-Rodríguez, J.V., Guzman, J.J., Torres, Y. (2019). Balancing Porosity and Mechanical Properties of Titanium Samples to Favor Cellular Growth against Bacteria. *Metals*, (9), 1039. <https://doi.org/10.3390/met9101039>
24. Tobin, E.J. (2017). Recent coating developments for combination devices in orthopedic and dental applications. A literature review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, (112), 88-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2017.01.007>
25. Nicholson, J.W. (2019). Titanium Alloys for Dental Implants: A Review. *Prosthesis*, (2), 100–116.
26. Eliaz, N. (2019). Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review. *Materials*, (12:3), 407.
27. Hallab, N. J., Jacobs, J.J. (2013). Orthopedic Applications, in *Biomaterials Science (Third Edition)*, 841-882.
28. Zafar, M.S., Farooq, I., Awais, M., Najeeb, S., Khurshid, Z., Zohaib, S. (2019). Chapter 11-Bioactive surface coatings for enhancing osseointegration of dental implants. In *Biomedical, Therapeutic and Clinical Applications of Bioactive Glasses*. Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 313–329.
29. Kunčická, L., Kocich, R., Lowe, T.C. (2017). Advances in metals and alloys for joint replacement. *Prog Mater Sci*, (88), 232–280. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.002>
30. Kulkarni, O., Kakandikar, G. (2022) Formability Assessment with Microstructural Investigations for Zirconium 702 Thin Foils: Bio-Material Applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2044131>
31. Jung, J.H., Kim, S.Y., Yi, Y.J., Lee, B.K., Kim, Y.K. (2018). Hydroxyapatite-Coated implant: Clinical prognosis assessment via a retrospective Follow-Up study for the average of 3 years. *J Adv Prosthodont*, (10), 85–92.
32. Su, Y., Cockerill, I., Zheng, Y., Tang, L., Qin, Y., Zhu, D. (2019). Biofunctionalization of metallic implants by calcium phosphate coatings. *Bioactive Materials*, (4), 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.05.001>
33. Kumari, R., Bhadur, Y.K., Barole, S., Archana, K., Besra, L.D. (2021). Microstructural characterisation and wettability behaviour of nano-HA coating on Ti-6Al-4V alloy by electrophoretic deposition method (EPD). *Advances in Materials and Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1959106>
34. Kumar, A., Kumar, N.S., Bijalwan, P., Dutta, M., Banerjee, A., Laha, T. (2019). Mechanical and corrosion properties of plasma-sprayed Fe-based amorphous/nanocrystalline composite coating. *Advances in Materials and Processing Technologies*, (5:2), 371-377. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1598129>
35. Dobrzański, L.A., Dobrzańska-Danikiewicz, A.D., Gaweł, T.G. (2017). Computer-aided design and selective laser melting of porous biomimetic materials. *Adv Mater Process Technol*, (3), 70-82.
36. Hassanen, J., Tunde, K., János, K. (2020). Investigating the impact of a selective laser melting process on Ti6Al4V alloy hybrid powders with spherical and irregular shapes. *Advances in Materials and Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1829960>
37. Dubrov, A. V., Mirzade, F. Kh., Dubrov, V. D. (2019). On the dendrite growth simulation during multitrack selective laser melting process. *Journal of Physics: Conference Series*, (1410:1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012026>
38. Tan, C. (2018) Selective laser melting of high-performance pure tungsten: parameter design, densification behavior and mechanical properties. *Sci Technol Adv Mater*, (19:1), 370-380. <https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1455154>
39. Jia, Q., Gu, D. (2014). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts:

- Densification, microstructure and properties. *Journal of Alloys and Compounds*, (585), 713-721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171>.
40. Panwisawas, Ch., Basoalto, H. C. (2017). Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: Experimental and modelling. *Acta Materialia*, (126), 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.062>.
 41. Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A. (2019). On Coating Techniques for Surface Protection: A Review. *J Manuf Mater Process*, (3:1), 1-22. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>.
 42. Alontseva, D., Azamatov, B., Voinarovych, S., et al. (2020). Development of technologies for manufacturing medical implants using CNC machines and microplasma spraying of biocompatible coatings. *Prz Elektrotech*, (96:4), 154-157.
 43. Alontseva, D., Ghassemieh, E., Voinarovych, S., et al. (2020). Manufacturing and characterisation of robot assisted microplasma multilayer coating of titanium implants: Biocompatible coatings for medical implants with improved density and crystallinity. *Johnson Matthey Technol Rev*, (64:2), 180-191. <https://doi.org/10.1595/205651320X15737283268284>