Айнул Акмар – PhD, профессор, Технологический Университет Петронас, Малайзия; e-mail: ainulakmar_mokhtar@utp.edu.my. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3522-1113.

Received 02.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-36

МРНТИ 55.21.99

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық*
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

TI-6AL-4V ҚОРЫТПАСЫНАН ЖАСАЛҒАН КОРТИКАЛДЫ СҮЙЕК БҰРАНДАЛАРЫН СББ БІЛДЕКТЕРІНДЕ ӨНДІРУ КЕЗІНДЕ КЕСКІШ ҚҰРАЛ ТОЗУЫН БЕЙІМДЕЛМЕЛІ ӨТЕМДЕУ

Аңдатпа: *Мақалада сандық бағдарламалық басқаруы бар білдектерде Ti-6Al-4V титан қорытпасынан дайындалатын кортикальды сүйек бұрандаларының геометриялық параметрлерінің дәлдігін қамтамасыз ету мәселесі қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі медициналық имплантаттардың сапасына қойылатын жоғары талаптармен және кескіш құралдың жинақталған тозуы жағдайында бұранда қалыптастыру процесінің тұрақтылығын сақтау қажеттілігімен негізделген. Жұмыстың мақсаты – СББ жүйесінің құралдары арқылы бұрандакескіш бастиектің тозуын бейімделмелі өтемдеу әдісін әзірлеу және оны эксперименттік тұрғыдан растау. Зерттеулер Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында орындалды. Тәжірибелік үлгілер MANURHIN K'MX 726 EVO бойлық жону автоматында дайындалды, ал бұранда геометриялық параметрлерін бақылау Mahr MarSurf CD 140 контурографы арқылы жүргізілді. Эксперименттік бағдарлама құралдың пайдаланылу кезеңдерін қамтитын тоғыз өңдеу режимін, сондай-ақ ең жоғары 57 м жинақталған өңдеу ұзындығын қамтыды. Зерттеу нәтижелері құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан сайын бұранда қадамының, профиль тереңдігінің және бүйір беттер бұрыштарының жүйелі өзгерістері байқалатынын көрсетті. Жинақталған өңдеу ұзындығына байланысты құралдың түзету ығысу шамасын анықтайтын эмпирикалық модель әзірленді. Ең жоғары зерттелген өңдеу ұзындығы үшін ΔZ = 0,0509 мм мәні алынды, бұл басқару бағдарламасында енгізілген 0,050 мм өтемдеумен іс жүзінде сәйкес келді. Есептік түзетуді енгізгеннен кейін бұранда қадамының ауытқуы номиналды 1,25 мм мәнінен 1,28 % құрап, құралды ауыстырмай-ақ бұранда профилінің тұрақты геометриясын сақтауға мүмкіндік берді. Жұмыстың практикалық маңыздылығы медициналық имплантаттарды дайындау дәлдігін арттырумен, бұрандакескіш бастиектің тиімді пайдалану мерзімін ұлғайтумен және өндірістік шығындарды төмендетумен сипатталады. Болашақ зерттеулер кескіш құралдың тозуын автоматты бақылау жүйелерін әзірлеуге және бейімделмелі өтемдеу алгоритмдерін интеллектуалды цифрлық өндірістік жүйелерге енгізуге бағытталған.*

Түйін сөздер: *кортикальды сүйек бұрандасы, Ti-6Al-4V, кескіш құралдың тозуы, бейімделмелі өтемдеу, эмпирикалық модель, СББ білдектері, бұранда профилін қалыптастыру, медициналық имплантаттар.*

Кіріспе

Отандық медициналық бұйымдар өндірісін дамыту Қазақстан Республикасының денсаулық сақтау жүйесін жаңғыртудың басым бағыттарының бірі болып табылады.

Саланың дамуындағы стратегиялық бағыттарына сәйкес медициналық құралдар мен бұйымдарды жобалау және өндіру үшін заманауи технологияларды енгізу арқылы денсаулық сақтау қызметтерінің қолжетімділігі мен сапасын арттыруға ерекше назар аударылуда.

Кортикалды сүйек бұрандалары травматология мен ортопедияда ең кеңінен таралған өнімдерігің бірі болып табылады, олар сынықтарды емдеу кезінде, реконструктивтік хирургияда және басқа да остеосинтез әдістерінде сүйек сынықтарын бекітуге арналған.

©К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық, 2026

Ортопедиялық имплантаттарды жасау кезінде жоғары механикалық беріктігі, биоүлесімділігі бар, тат баспайтын және сенімді остеоинтеграцияны қамтамасыз ететін кең таралған титан және оның қорытпалары қолданылады.

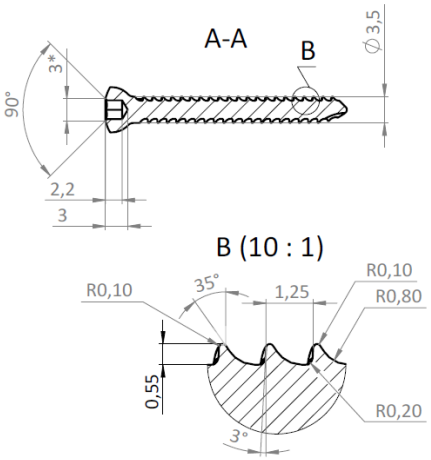
Титан қорытпалары сүйекті бекіту және алмастыру жүйелерінде кеңінен қолданылады, себебі олар ағзада әсер ететін елеулі механикалық жүктемелерге төтеп бере алады және сүйек тінімен қолайлы өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді (Al-Shalawi et al., 2023; Yang et al., 2022). Қазіргі уақытта медициналық имплантаттар мен мамандандырылған құралдардың басым бөлігі шетелден әкелінеді, бұл халықаралық сапа, беріктік, биоүйлесімділік және функционалдық талаптарға сәйкес келетін отандық медициналық бұйымдарды әзірлеу қажеттілігін көрсетеді.

Аталған мәселені шешу шетелдік жеткізушілерге тәуелділікті төмендетуге, өндірістегі жергілікті қамту деңгейін арттырып, ішкі және халықаралық нарықтарға бағытталған бәсекеге қабілетті өнімдерді өндірудің іргетасын қалайды. Медициналық имплантаттарды өндіру үшін ең перспективті материалдардың бірі Ti-6Al-4V титан қорытпасы болып табылады. Аталған материал жоғары үлесімді беріктікке, тат басуға төзімділікке, биоүйлесімділікке және ұзақтылыққа ие (Geetha et al., 2009; Yang et al., 2022). Пайдалану сипаттамаларының үйлесімінің арқасында аталған материал травматология және ортопедияда сүйек бұрандаларын, пластиналарды және басқа да өнімдерді өңдеуге кеңінен қолданылады (Kengesbekov et al., 2025; Yang et al., 2022). Сонымен қатар Ti-6Al-4V қорытпасы өңделуі қиын материалдар тобына кіреді, себебі бұл материал төменгі жылуөткізгіш, жоғарғы беріктікке және кесу аймағында жылудың шоғырлануына ие. Аталған қасиеттер кескіш материалдың жылдам тозуына және өңдеу дәлдігінің төмендеуіне әкеледі (Bamford, 2016).

Титан қорытпаларын өңдеу сұрақтарына көптеген зерттеулер арналған. Ғылыми әдебиеттерде кескіш құралдардың беріктігін арттыру, кесу параметрлерін оңтайландыру, өңделетін аймақтағы жылу жүктемесін азайту және титан қорытпаларынан жасалған өнімдердің сапасын жақсарту үшін заманауи технологиялық шешімдерді қолдану мәселелері қарастырылады (Doudkin et al., 2020). Механикалық өңдеу технологияларын жақсарту мен қарат титан қорытпаларынан жасалған медициналық құрылғылардың өнімділік сипаттамаларын жақсарту мақсатында, соның ішінде имплантардың биологиялық үйлесімділігі мен беріктігін арттыруға арналған функционалдық жабындар мен беткі модификациялау әдістерін әзірлеу бойынша зерттеулер белсенді түрде жүргізілуде (Kombayev et al., 2025). Соңғы жылдары заманауи өндіріс және сапаны бақылау технологияларын интеграциялауға ерекше назар аударуда, бұл медициналық құрылғыларды өндіруде жоғары дәлдік деңгейін қамтамасыз етеді. Бірақ, бұранданың күрделі пішіні бар медициналық бұйымдардың геометриялық параметрлерін тұрақтандыру мәселелері және кесу құралдардың тозуы бұранданы салу дәлдігіне әліде қажетті зерттелмеген. Осы зерттеу аясында хирургиялық сүйек бұрандаларына қойылатын халықаралық талаптарды талдау және қазіргі остеосинтез жүйелерінде қолданылатын конструкциялық шешімдер негізінде диаметрі 3,5 мм кортикалды сүйек бұрандасының жобасы әзірленді (International Organization for Standardization, 1991; DePuy Synthes, 2021).

1 суретте әзірленген бұйымның геометриялық параметрлері көрсетілген. Бұл бұранданың конструкциясы 1,25 мм қадамды, 35° профиль бұрышы және 0,55 мм орама биіктігі бар арнайы сүйек орама профилін қамтиды, бұл картикалды сүйекте сенімді бекітуді қамтамасыз етіп, осы кластың құрылғыларына қойылатын қазіргі талаптарға сәйкес келеді.

Бұйымды әзірлеген кезде 29 мм ұзындықта қажетті механикалық беріктік талаптары, бекіту тұрақтылығы және титан қорытпаларынан жасалған медициналық имплантарды өңдеускезінде қойылатын талаптар ескерілді (Geetha et al., 2009; Yang et al., 2022).



Сурет 1 – Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандасының құрылымы және бұранда профилінің геометриялық параметрлері
(Ескерту: авторлармен құрастырылды)

Кортикалды сүйекке арналған бұранданың геометриялық дәлдігіне қойылатын қатаң талаптар өндірістің барлық кезеңдерінде процестің тұрақтылығын қамтамасыз етуді қажет етеді. Соңғы зерттеулер көрсеткендей, геометриялық ауытқуды болжауға және өңдеу қателіктерін бейімді түрде түзетуге арналған интеллектуалды әдістерді қолдану СББ білдектерінда бөлшектерді өңдеудің дәлдігін айтарлықтай жақсартып, дайын өнімнің сапасына құрал тозуының әсерін азайтуға мүмкіндік береді (Kumar & Vasu, 2025; Sun et al., 2025).

Осы тұрғыда, басты міндет – сандық басқару жүйесінің мүмкіндіктерін пайдалана отырып, құралдың тозуын тікелей өтеу әдістерін әзірлеу.

Зерттеудің мақсаты – Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандаларын СББ білдектерінде өндіру кезінде кескіш құрал тозуын бейімделмелі өтемдеу әдісін әзірлеу.

Қойылған мақсаттарға жету үшін келесі тапсырмалар жасалған: медициналық имплanttарға қойылатын халықаралық талаптарға сәйкес кортикалды сүйек бұрандасын жобалау; кесу құралының тозуы бұранданың геометриялық параметрлеріне әсерін зерттеу; құралдың тозу деңгейін ескере отырып басқару бағдарламасын реттеу алгоритмін әзірлеу; ұсынылған әдістің эксперименттік тексерілуі және оның дайын өнімнің өңдеу дәлдігіне әсерін бағалау.

Материалдары мен зерттеу әдістері

Зерттеулер Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында орындалды (Өскемен, Қазақстан).

Зерттеу объектісі ретінде Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) қорытпасынан дайындалған, диаметрі 3,5 мм кортикалды сүйек бұрандасы таңдалды. Бұранданың конструкциясы остеосинтезге арналған медициналық имплантаттарға қойылатын талаптар негізінде әзірленді. 1-кестеде зерттелген дайындаманың нақты химиялық талдауы емес, Ti-6Al-4V ELI қорытпасына ASTM F136-26 стандартымен белгіленген химиялық құрамның рұқсат етілген шектері берілген.

Кесте 1 – ASTM F136-26 стандарты бойынша Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) қорытпасының химиялық құрамына қойылатын талаптар

Элемент	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Рұқсат етілген мөлшері, масс. %	5,50-6,50	3,50-4,50	≤0,25	≤0,13	≤0,08	≤0,05	≤0,012	қалғаны

Ескерту: ASTM F136-26 «Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401)» стандарты негізінде авторлар құрастырған.

Дайындамалар Fanuc (Fanuc Corporation, Japan) сандық басқару бағдарламасымен қамтамасыз етілген MANURHIN K'MX 726 EVO (Manurhin K'MX, France) бойлық жону автоматында жасалған (2 сурет).



Сурет 2 – MANURHIN K'MX 726 EVO бойлық жону автоматы
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Негізгі техникалық сипаттамалары: өңделетін шыбықтың ең үлкен диаметрі – 26 мм, шпиндельдің ең жоғары айналу жиілігі – 8000 айн/мин, алдыңғы суппорттың жүрісі – 380 мм, электршпиндельдің қуаты – 7,5/10,5 кВт.

Бұранданың сыртқы профилі Landis SX-6T (Landis Tool Company, АҚШ) бұрандакескіш бастиегіне орнатылған алты ауыспалы профильді кескіш пластинамен қалыптастырылды (3-сурет). Осы құралдың ерекшелігі – бұранда профилі бірнеше кескіш элементтің синхрондалған жұмысы арқылы қалыптасады, бұл жоғары өңдеу өнімділігін қамтамасыз етеді, бірақ сонымен бірге үдерісті кескіш жиектердің жинақталатын тозуына сезімтал етеді. Сондықтан, кесу жиектерінің геометриясындағы кез келген өзгеріс қалыптасатын бұранда параметрлеріне тікелей әсер етіп, СББ жүйесі арқылы қателерді түзету әдістерін қолдануды талап етеді.



Сурет 3 – Landis SX-6T бұрандакескіш бастиегі және оған орнатылған алты ауыспалы профильді кескіш пластина
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Механикалық өңдеуден кейін бөлшектердің бетіне Senfeng SF200F (Jinan Senfeng Technology Co., Ltd., Қытай) талшықты лазерлік таңбалау жүйесімен белгі салынды. Белгілеу 1064 нм толқын ұзындығындағы лазер сәулесімен жүргізілді. Жабдықтың орналастыру дәлдігі ±0,001 мм, ал ең аз белгілеу сызығының ені – 0,01 мм болды. Өңделген бұрандалардың геометриялық параметрлері MarSurf CD 140 (Mahr GmbH, Göttingen, Германия) контурографының көмегімен өлшенді. Өлшеу бұранданың бойлық профилі бойынша жүргізіліп, контурограммада белгіленген профиль элементтері бойынша бұранда қадамы, профиль тереңдігі және сол және оң жақ бүйір беттердің бұрыштары анықталды. Әр үлгі үшін бір контурограмма алынды. Аспаптың паспорттық ажыратымдылығы 6 нм, өлшеу жылдамдығы 0,02-10 мм/с, ал өлшеу диапазоны қолданылған зонд конфигурациясына байланысты 140 мм-ге дейін құрайды. Өлшеу белгісіздігіне жеке есептеу жүргізілген жоқ.

Бұрандакескіш бастиек жұмысының бұранда геометриялық параметрлеріне әсерін бағалау мақсатында тоғыз өңдеу режимінен тұратын эксперименттік бағдарлама әзірленді. Әр режимде бір бұранда дайындалып, оның профилі MarSurf CD 140 контурографында бір рет өлшенді. Барлық режимдерде бір бұрандакескіш бастиек пен бір кескіш пластиналар жиынтығы қолданылды. Эксперименттік жоспар мен зерттелген режимдердің негізгі параметрлері 2-кестеде көрсетілген.

Барлық эксперименттерде бір кесу параметрлері қолданылды: кесу жылдамдығы Vc = 80 м/мин, берілу жылдамдығы f = 0,05 мм/айн және кесу тереңдігі ap = 0,15 мм. ΔZ шамасы кескіш жиектің тікелей өлшенген физикалық тозуын емес, құралдың жинақталған жұмыс

ұзындығына байланысты бұранда профилінің геометриялық ауытқуын өтеу үшін қажетті технологиялық ығысуды сипаттайды.

Кесте 2 – Кортикалды бұрандаларды өңдеу кезіндегі эксперименттік зерттеулердің режимдері

Режим	Бағдарлама	Vc, м/мин	f, мм/айн	ap, мм	Бағдарлама бойынша өңдеу ұзындығы, м	ΔZ, мм	Өтем (Компенсация)
№ 1	PROT12	80	0,05	0,15	12,0	0,000	Жоқ
№ 2	PROT22	80	0,05	0,15	22,0	0,000	Жоқ
№ 3	PROT32	80	0,05	0,15	32,5	0,000	Жоқ
№ 4	PROT22	80	0,05	0,15	22,0	0,010-0,020	Жоқ
№ 5	PROT32	80	0,05	0,15	32,5	0,020-0,035	Жоқ
№ 6	PROT49.3	80	0,05	0,15	49,3	0,035-0,050	Жоқ
№ 7	PROT49.3	80	0,05	0,15	49,3	0,050-0,070	Жоқ
№ 8	PROT57	80	0,05	0,15	57,0	0,070-0,090	Жоқ
№ 9	PROT57	80	0,05	0,15	57,0	0,050	G1 G91 Z−0.05

Ескертулер: авторлармен құрастырылған. ΔZ бұранда кесу басындағы кескіш тістердің жинақталған тозуын туындайтын пішіндеу жолының эквивалентті ығысуын сипаттайды.

ΔZ диапазондары қайталама өлшеулердің статистикалық шашырауын емес, тиісті өңдеу режимдерінде қарастырылған технологиялық ығысу аралығын көрсетеді. №1-№3 режимдері бұранданың негізгі геометриялық параметрлерін анықтау үшін қолданылды. №4-№6 режимдері бұранда кескіш басының тозудың әртүрлі кезеңдеріне сәйкес келеді. №9 режимінде басқару бағдарламасы қалыптасатын профильдің геометриясына тозудың әсерін өтеу үшін Z осі бойымен қосымша салыстырмалы құрал қозғалысын (G1 G91 Z-0.05) еңгізу арқылы реттелді.

Ұсынылған тәсілдің тиімділігі СББ басқару бағдарламасына түзету еңгізгенге дейін және кейін алынған бұранда параметрлерінің салыстырмалы талдауы негізінде бағаланады. Контур өлшеулерінің нәтижелері бұранда қадамы, профиль тереңдігі, бүйірлік бұрыштар және пішін ауытқуларын анықтау үшін қолданылды, одан кейін алынған мәндер жұмыс бөлшегінің жобалық параметрлерімен салыстырылды. Материал партиясының нөмірі, жеткізілу күйі және сертификатта көрсетілген нақты химиялық құрамы осы зерттеуде тіркелмеген, бұл нәтижелерді материалдың нақты партиясына қатысты түсіндіру кезінде ескерілуі тиіс.

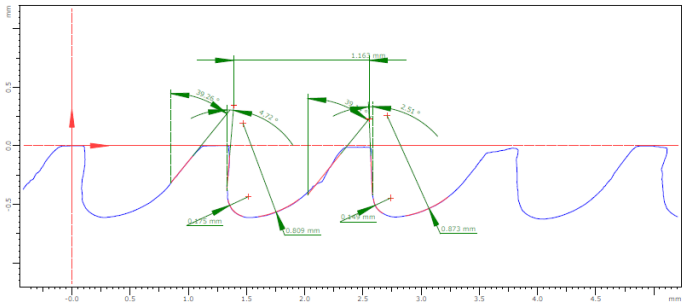
Нәтижелер және оларды талқылау

Контурографиялық өлшеулерді салыстыру кезінде әрбір эксперименттік топтағы көршілес режимдердің бұранда профильдері арасында айқын геометриялық айырмашылықтар байқалмады. Сондықтан салыстырмалы талдау үшін өңдеу процесінің үш негізгі күйін сипаттайтын №3, №6 және №9 режимдер таңдалды: құралдың бастапқы күйі, жинақталған жұмыс кезеңі және бейімделмелі өтемдеу енгізілгеннен кейінгі күй.

Жаңа құралмен өңдеу кезінде (№ 3 режим) алынған бұранда профилі 4 суретте көрсетілген. Өлшеу нәтижелері бойынша нақты бұранда қадамы 1,163 мм болып, номиналды 1,25 мм-ге қарағанда номиналды 1,25 мм мәнінен ауытқу 6,96% құрады. Профиль тереңдігі 0,809-0,873 мм аралығында өзгеріп, бүйірлік бұрыштар 39,25-42,72° аралығында болды. Пішіннің номиналды мәнінен ауытқуына қарамастан, бұранда профилі таңдалатын бөліктің бүкіл ұзындығы бойына біркелкі геометриямен және жергілікті қалыптау ақауларының болмауымен сипатталады.

Алынған нәтижелер өңдеу жүйесінің бастапқы күйін көрсетеді және кесу қырларының тозуының әртүрлі кезеңдерінде қалыптасқан бұранда профильдерімен кейінгі салыстыру үшін бастапқы нүкте ретінде пайдаланылды. Орнатылған қадам, профиль тереңдігі және бүйірлік бұрыштар параметрлері құралдың тозуының әсері мен бақылау бағдарламасының бейімделмелі түзету тиімділігін бағалауда эталондық параметрлер ретінде алынды.

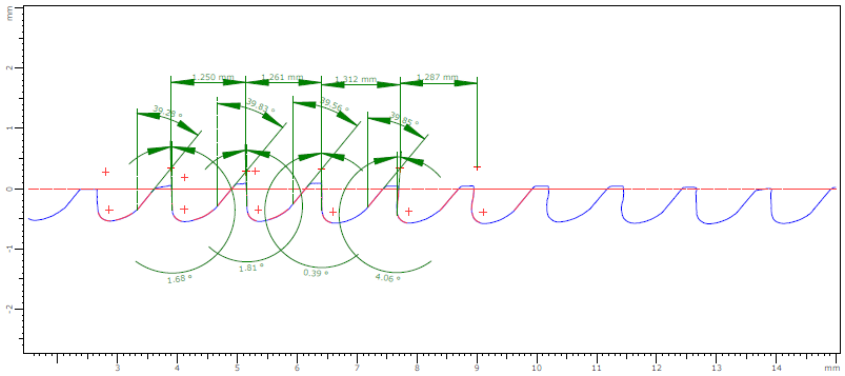
5 суретте № 6 өңдеу режимінде алынған бұранда профилінің контурлық талдау нәтижелері көрсетілген. Өлшенген бұранда қадамы 1,250-1,312 мм аралығында болып, бұл минималды ауытқулармен 1,25 мм номиналды мәнге сәйкес келеді. Бүйірлік беттер бұрыштары 38,68-39,82°-ге дейін өзгеріп, №3 өңдеу режимімен салыстырғанда айтарлықтай аз ауытқу көрсетті.



Сурет 4 – Машиналық № 3 өңдеу режим (Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм, жаңа құрал) қолданылып жасалған кортикалды сүйек бұрандасының профилі

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

4-ші және 5-ші суретте көрсетілген нәтижелерді салыстыру көрсеткендей, үйкелген (приработка) кезеңінен кейін кескіш тістердің бұранда профилі анағұрлым тұрақты болады. Жана құралда номиналды мәнінен бұранда қадамының ауытқуы және бүйірлік бет бұрыштарының ауытқуының ұлғаюы байқалғанымен, №6 жұмыс режимінде профильдің геометриялық параметрлері біркелкіленіп, жобалық мәндерге жақындады. Ең айтарлықтай, өзгерістер бұранда қадамында байқалады, ол өлшенген бөлімдердің көпшілігінде іс жүзінде номиналды мәнге сәйкес келеді.



Сурет 5 – № 6 өңдеу режимінде (Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм, құрал тұрақты күйінде) өндірілген кортикалды сүйек бұрандасының профилінің контурлық талдау нәтижелері

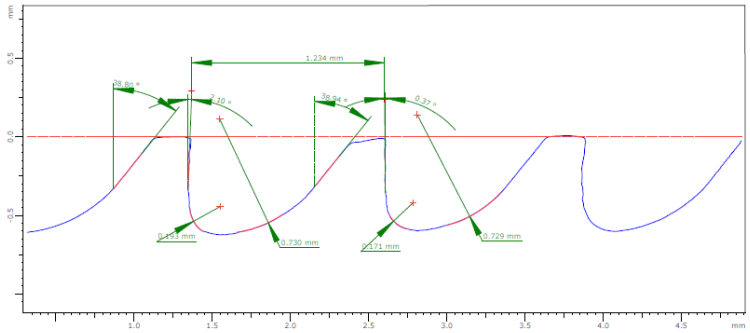
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Алынған нәтижелер № 6 режимнің құралдың тұрақталған тозу кезеңіне сәйкес келетінін көрсетеді, осы кезеңде бұранданы қалыптастырудың ең жоғары сапасы қамтамасыз етіледі. Бұл күйде бұранданың геометриялық параметрлерінің ауытқуы минималданады және нақты профиль жобалық геометрияға ең жақын сәйкес келеді.

Сонымен қатар, бақылау бағдарламасын реттемей –ақ бұранда кескіш басын үздіксіз пайдалану кескіш тістердің геометриясының өзгеруіне байланысты жүйелі қателіктердің жиналуына әкеледі. Нәтижесінде бұранда қадамы, профиль тереңдігі және бүйірлік бұрыштар жобалық мәндерінен ауытқу ықтималдығы артады, бұл бейімделмелі құрал тозуын өтеу әдістерін қолдануды қажет етеді.

Ұсынылған бейімделмелі өтемдеу әдісінің тиімділігін бағалау үшін № 9 режимде кескіш қырлардың жинақталған тозу мөлшерін ескере отырып, басқару бағдарламасына түзету енгізілді. 6 суретте көрсетілген контурографиялық өлшеулердің нәтижелері түзету әсерлерін еңгізгеннен кейін бұрандалы профильдің тұрақты геометриясының сақталуын көрсетеді.

Өлшенген бұранда қадамы 1,234 мм болды, бұл 1,25 мм номиналды мәнге қатысты 1,28% ауытқуға сәйкес келеді. Бүйірлік беттердің бұрыштары 38,84-39,10° диапазонында болды, ал профиль тереңдігі 0,729-0,730 мм болды. № 6 режиммен салыстырғанда геометриялық параметрлердің таралуының төмендеуі байқалады, бұл құралдың қозғалыс траекториясын реттегеннен кейін қалыптау процесінің тұрақтанғанын көрсетеді.



Сурет 6 – Құрал жұмысына байланысты геометриялық ауытқуды бейімделмелі өтемдеуден кейінгі кортикалды сүйек бұрандасы профилінің контурографиялық талдауы
(№9 режим, Vc = 80 м/мин, f = 0,05 мм/айн, ap = 0,15 мм)
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Бұранданы кескіш бастың одан ары қолдануынақарамастан, бейімделмелі өтемдеуді қолдану профиль параметрлерін жобалық мәндерге жақын деңгейге сақтауға мүмкіндік береді. Ең айқын әсер бүйірлік беттердің бұрыштары мен профиль тереңдігінің өзгеруінің төмендеуінде байқалады, бұл кескіш қырлардың жинақталған тозуының қалыптасқан бұранданың геометриясына әсерінің төмендеуін көрсетеді.

Алынған нәтижелер кескіш құралды ауыстырмай СББ жүйесінің көмегімен қалыптау қателіктерін өтеу мүмкіндігін растайды. Осылайша, ұсынылған тәсіл кортикалды сүйек бұрандаларын өндірудің қажетті дәлдігін сақтауға және бұрандакескіш бастиектың тиімді ресурсын арттыруға мүмкіндік береді.

Құрал жұмысына байланысты қалыптау ауытқуын сандық бағалау үшін өңдеу ұзындығы L мен қажетті өтемдеу ығысуы ΔZ арасындағы эксперименттік тәуелділік талданды. Зерттеу қайталама үлгілерге негізделген статистикалық эксперимент емес, салыстырмалы технологиялық зерттеу ретінде жүргізілгендіктен, алынған деректер зерттелген диапазон шегінде сызықтық функциямен аппроксимацияланды:

$$\Delta Z = 0{,}0011 \cdot L - 0{,}0118, \qquad (1)$$

мұндағы ΔZ – құралдың Z осі бойынша өтемдеу ығысуы, мм; L – жинақталған өңдеу ұзындығы, м.

Алынған эмпирикалық тәуелділік зерттелген технологиялық жүйе мен L = 12–57 м диапазонында бұранда профилінің ауытқуын өтемдеу үшін қажетті ΔZ шамасын бағалауға мүмкіндік береді. (1) теңдеуге сәйкес өңдеу ұзындығының әрбір 10 м-ге ұлғаюы Z осі бойынша шамамен 0,011 мм қосымша түзетуді қажет етеді.

Жинақталған өңдеудің ең үлкен ұзындығы L = 57 м болатын PROT57 режимі үшін түзетудің есептік мәні:

$$\Delta Z = 0{,}0011 \cdot 57 - 0{,}0118 = 0{,}0509 \text{ мм}, \qquad (2)$$

бұл G1 G91 Z−0.05 командасы арқылы №9 режимде жүзеге асырылған өтемақы мөлшерімен іс жүзінде сәйкес келеді.

Ұсынылған бейімделмелі өтемдеу алгоритмінің практикалық іске асырылуы 7-суретте көрсетілген. №3 және №6 режимдер үшін басқару бағдарламасында түзету әсерлері болмайды, өйткені өңдеу жаңа құралмен немесе тұрақтандырылған тозу сатысында тұрған құралмен жүзеге асырылды. Құралдың жинақталған жұмыс кезеңіне сәйкес келетін №9 режим үшін бағдарламаға (1) теңдеуімен есептелген G1 G91 Z-0.05 құралының салыстырмалы орын ауыстыруының қосымша командасы еңгізілді. Осылайша, түзету әсері эмпирикалық түрде берілмеді, бірақ жинақталған өңдеу ұзындығы мен өтемақы мөлшері арасындағы эксперименттік белгіленген тәуелділік негізінде анықталды.

Нәтижелер нақты бұранда геометриясының жобалық параметрлерге ең жақын сәйкестігі кесу қырларының тұрақтандырылған күйінің сатысына сәйкес келетін №6 режимде байқалғанын көрсетеді. Алайда, басқару бағдарламасын түзетпестен өңдеу ұзындығының одан әрі ұлғаюы жүйелі қалыптау қателігінің жинақталуына бұранданың геометриялық параметлерінің номиналды мәндерден біртіндеп ауытқуына әкеледі.

G97 M3 S2000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-12.0 F0.05 G1 X10 A135 G90 G1 X15 G40 M16	G97 M3 S3000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-22.0 F0.05 G1 X10 A135 G90 G1 X15 G40 M16	G97 M3 S4000 G95 G1 X5 U6.5 F0.05 G96 S80 G92 S4000 M15 X1 G95 G1 Z-49.30 F0.05 G1 X10 A135 G1 G91 Z-0.05 G90 G1 X15 G40 M16
№ 3 – эталон (жаңа құрал).	№ 6 – жұмыс күйіндеге оңтайлы геометрия	№ 9 – құралдың тозуы кәзірдің өзінде жоғарылаған

Сурет 7 – № 3, № 6 және № 9 режимдер үшін СББ басқару бағдарламасында тозуды бейімделмелі өтемдеу алгоритмін енгізу

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

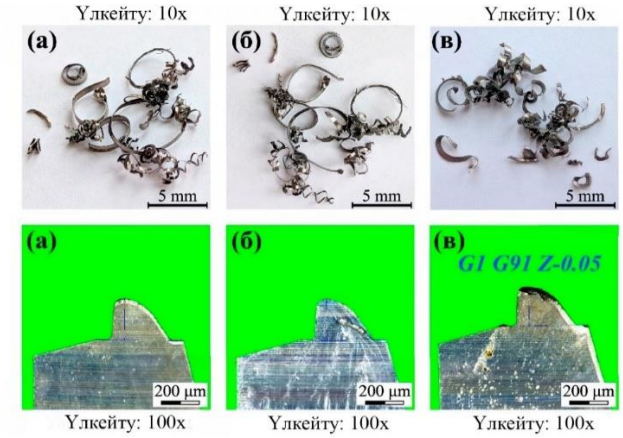
Бейімделмелі өтемдеуді № 9 режимде қолдану құралды одан әрі пайдалануға қарамастан, бұрандалы профиль параметрлерін №6 режиммен салыстыруға болатын деңгейде сақтауға мүмкіндік береді. Бұл түзету әсерлерін есептеу және бұрандакескіш бастиекын ауыстырмай қажетті өңдеу дәлдігін сақтау үшін эмпирикалық тәуелділікті (1) пайдалану мүмкіндігін растайды.

Осылайша, ұсынылған бейімделмелі өтемдеу алгоритмі кескіш қырлардың тозуының қалыптасқан бұранданың параметрлеріне әсерін азайтады және кортикалды сүйек бұрандаларын өндірудің қажетті дәлдігін сақтай отырып, құралды тиімді пайдалану мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Ұсынылған әдістің тиімділігін сандық бағалау үшін жаңа құралмен өңдеу кезінде алынған бұрандалы профильдің геометриялық параметрлерін салыстырмалы бағалау жүргізілді (№ 3 режим), кескіш қырлардың тұрақтандырылған күйі жағдайында (№ 6 режим) және тозудың бейімделмелі өтемдеуді қолданғаннан кейін (№ 9 режим).

Өлшеу нәтижелері өтемақы алгоритмін қолданғаннан кейін бұранданың номиналды мәннен минималды ауытқуы байқалғанын көрсетті. Бұрандакескіш бастиектың одан әрі жұмысына қарамастан, түзету әсерін қолдану профиль параметрлерін тұрақтандырылған құралдың күйімен салыстыруға болатын деңгейде сақтауға мүмкіндік берді. Бұл СББ жүйесінің көмегімен қалыптау қателіктерін өтеуге ұсынылған тәсілдің тиімділігін растайды.

Бұрандакескіш бастиектің әртүрлі жұмыс кезеңдеріндегі кесу процесін сапалық бағалау үшін жоңқаның сыртқы көрінісі мен кескіш жиектердің оптикалық кескіндері салыстырылды (8-сурет). №3 режимде қысқа және сегменттелген жоңқа байқалды. Құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан №6 режимде жоңқа ұзындығының ұлғаюы және кескіш жиек пішінінің өзгеруі байқалды. №9 режимде 0,05 мм өтемдеу түзетуі енгізілгеннен кейін жоңқа түзілуінің айқын бұзылу белгілері анықталмады. Бұл кескіндер сапалық салыстыру үшін берілген және өтемдеу алгоритмінің тиімділігін тікелей сандық дәлелдемейді.



Сурет 8 – Әртүрлі өңдеу режимдеріндегі жоңқа (10×, масштаб 5 мм) және кескіш жиек (100×, масштаб 200 мкм): а – №3 режим; б – №6 режим; в – №9 режим, ΔZ = 0,05 мм өтемдеуден кейін

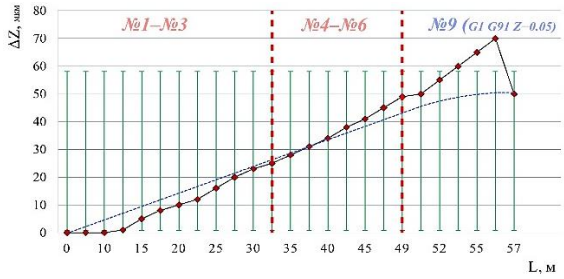
(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Жоңқа мен кескіш жиектердің кескіндері қосымша сапалық сипатқа ие. 0,05 мм түзету құралдың нақты физикалық тозуын азайтпайды, тек оның бұранда профилінің геометриясына ықпалын өтемдеуді. Сондықтан алгоритмнің тиімділігі жоңқаның сыртқы көрінісімен емес, түзетуге дейінгі және кейінгі контурографиялық өлшеу нәтижелерін салыстыру арқылы бағаланды. Құралды ауыстыру сыни тозуға қол жеткізгеннен кейін орындалатын дәстүрлі тәжірибеден айырмашылығы, ұсынылған тәсілде түзету әсерінің мәні жинақталған өңдеу ұзындығы мен құралдың тозу мөлшері арасындағы эксперименттік белгіленген тәуелділік негізінде есептеу әдісімен анықталады.

Зерттелген максималды жұмыс үшін L = 57 м (9 сурет) эмпирикалық модель қажетті түзету ΔZ = 0,0509 мм жылжуды анықтады, бұл іс жүзінде басқару бағдарламасында іске асырылған 0,050 мм жылжумен сәйкес келеді (ауытқу 1,8 % кем). Есептелген өтемақы еңгізілгеннен кейін бұранда қадамының ауытқуы 1,25 мм номиналды мәнге қатысты 1,28 % құрады, ал бүйір беттер бұрыштарының өзгеру диапазоны 38,84–39,10° аралығында сақталды, бұл құрал ұзақ уақыт істегеннен кейін де қалыптау процесінің тұрақтануын растайды.

Айта кету керек, түзету жылжуы небәрі 0,05 мм, бірақ оның әсері ұзындығы 29 мм кортикалды сүйек бұрандасының бүкіл бұрандалы бөлігінің қалыптасуына таралады. Осылайша құралдың қозғалыс траекториясының шамалы өзгеруі кесу режимдерін өзгертпестен және технологиялық жабдықтың дизайнына араласпай, функционалды бұранданың бүкіл ұзындығы бойынша жинақталған жүйелік қатені өтеуге мүмкіндік береді.

9 суретте көрсетілген тәуелділікті талдау жинақталған өңдеу ұзындығының ұлғаюы қажетті өтемақы мөлшерінің табиғи өсуімен қатар жүретінін көрсетеді.



Сурет 9 – ΔZ өтемдеу ығысуының өңдеу ұзындығына L байланысты эксперименттік және аппроксимациялық тәуелділігі

(Ескертулер – авторлармен құрастырылған)

Эксперименттік мәндер сызықтық аппроксимация нәтижесімен салыстырылды. Өлшеу белгісіздігіне жеке есептеу жүргізілмегендіктен, графиктегі мәндер статистикалық сенімділік интервалдары ретінде қарастырылмайды. Алынған тәуелділік тек зерттелген L = 12-57 м диапазонында өтемдеу ығысуды инженерлік бағалау үшін ұсынылады.

Технологиялық тұрғыдан алғанда, ұсынылған алгоритм кесу режимдерін өзгертпестен және бұранда кесу басын ауыстыру үшін технологиялық процесті тоқтатпай, бұранданың геометриялық параметрлерінің қажетті дәлдігін қамтамасыз етеді. Өндірістік - экономикалық тұрғыдан есептелген өтемдеуді пайдалану құралдың тиімді ресурсын ұлғайтуға, жабдықты қайта реттеу санын қысқартуға және олардың геометриясының дәлдігіне қойылатын талаптарды сақтай отырып, медициналық имплланттарды өндіру құнын төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл зерттеуде кескіш жиектің VB тозуы, кратер тереңдігі және жиек радиусы тікелей өлшенген жоқ. Сондықтан ΔZ физикалық тозу көрсеткіші емес, бұранда профилінің геометриялық ауытқуын өтеуге арналған эмпирикалық технологиялық параметр ретінде қарастырылды. Температуралық деформацияның, құралды орнату қатесінің, соғудың және білдек дәлдігінің әсері жеке бағаланбады және зерттеу нәтижелерінің шектеуі болып табылады.

Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде сандық бағдарламалық басқарылатын білдектерде Ti-6Al-4V қорытпасынан кортикалды сүйек бұрандаларын дайындау кезінде құрал жұмысына байланысты геометриялық ауытқуларды бейімделмелі өтемдеу тәсілі әзірленіп, эксперименттік түрде тексерілді. Алынған нәтижелер төмендегідей қорытынды жасауға

мүмкіндік береді. Құралдың жинақталған жұмыс ұзындығы артқан сайын бұранда қадамының, профиль тереңдігінің және бүйір беттер бұрыштарының өзгеретіні анықталды. Тозу параметрлері тікелей өлшенбегендіктен, байқалған геометриялық ауытқулар құралдың физикалық тозуының сандық көрсеткіші ретінде емес, зерттелген технологиялық жүйенің жинақталған жұмысына байланысты өзгерістер ретінде бағаланды.

Өңдеу ұзындығы мен қажетті өтемдеу ығысуы арасындағы эксперименттік деректердің сызықтық аппроксимациясы алынды. Зерттелген максималды жұмыс үшін L = 57 м түзету жылжуының есептік мәні ΔZ = 0,0509 мм болды, бұл G1 G91 Z−0.05 командасы арқылы СББ басқару бағдарламасында жүзеге асырылған 0,050 мм өтемақы мөлшерімен сәйкес келді.

Есептік бейімделмелі өтемдеуді қолдану кесу режимдерін өзгертпестен және бұрандакескіш бастиекын мерзімінен бұрын ауыстырмай қалыптау процесін тұрақтандыруды қамтамасыз ететіні эксперименталды түрде расталды. Түзету енгізілгеннен кейін бұранда қадамының номиналды 1,25 мм мәнінен ауытқуы 1,28% құрады, ал бүйір беттер бұрыштары 38,84-39,10° аралығында сақталды, бұл құралды ұзақ уақыт пайдалану кезінде бұранда профилінің қажетті геометриясының сақталуын көрсетеді.

Жоңқа мен кескіш жиектердің оптикалық кескіндерін салыстыру қосымша сапалық бағалау ретінде қолданылды. Өтемдеу алгоритмінің тиімділігі түзетуге дейінгі және кейінгі бұранда профилінің контурографиялық өлшеу нәтижелерімен бағаланды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы бұрандалардың қажетті дәлдігін сақтай отырып, бұрандакескіш бастиектің тиімді пайдалану мерзімін ұзарту, жабдықты қайта баптау санын және технологиялық тоқтап қалу уақытын қысқарту мүмкіндігімен сипатталады. Ұсынылған алгоритм қолданыстағы СББ жүйелерінде жабдықтың дизайнын өзгертпестен жүзеге асырылуы мүмкін және Ti-6Al-4V қорытпасынан жасалған кортикалды сүйек бұрандаларын жаппай өндіруде қолданылады.

Әрі қарай зерттеулердің болашағы кескіш құралдың тозуын автоматты бақылау жүйелерін әзірлеуге, бейімделмелі өтемақы алгоритмдерін цифрлық өндіріс жүйелеріне біріктіруге және медициналық имплланттармен өңдеу қиын материалдардың басқа түрлерін өңдеуге ұсынылған тәсілді кеңейтуге байланысты.

Әдебиеттер тізімі

1. Biomaterials as implants in the orthopedic field for regenerative medicine: Metal versus synthetic polymers / F.D. Al-Shalawi et al // Polymers. – 2023. – № 15(12). – P. 2601. https://doi.org/10.3390/polym15122601.
2. Bamford E. Tool wear in turning of titanium alloy Ti–6Al–4V: Challenges and potential solutions for crater wear, diffusion and chip formation / E. Bamford // Master's thesis, Uppsala University. – 2016.
3. Research of cutting temperature reducing of titanium alloy grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes / M. Doudkin et al // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. – 2020. – № 10(2). – P. 747-758. https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202074.
4. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review / M. Geetha et al // Progress in Materials Science. – 2009. – № 54(3). – P. 397-425. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004.
5. Development of biocompatible coatings for orthopedic joint implants / A.B. Kengesbekov et al // Physical Sciences and Technology. – 2025. – № 12(1-2). – P. 84-94. https://doi.org/10.26577/phst20251218.
6. Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra-low interstitials: Investigation of thickness and porosity control / K. Kombayev et al // Coatings. – 2025. – № 15(4). – P. 464. https://doi.org/10.3390/coatings15040464.
7. The progress in titanium alloys used as biomedical implants: From the view of reactive oxygen species / J. Yang et al // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2022. – № 10. – P. 1092916. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1092916.
8. DePuy Synthes. (2021). Small Fragment System: Surgical Technique. DePuy Synthes Companies.

9. International Organization for Standardization. (1991). ISO 5835:1991. Implants for surgery – Metal bone screws with hexagonal drive connection, spherical under-surface of head, asymmetrical thread – Dimensions. ISO.
10. Kumar A. Tool wear prediction using multi-sensor data fusion and attention-based deep learning / A. Kumar, V. Vasu // Production Engineering. – 2025. – № 19. – P. 455-471. https://doi.org/10.1007/s11740-024-01319-6.
11. Machining accuracy prediction and adaptive compensation method of CNC machine tool under absence of machining process sensing / J. Sun et al // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2025. – № 36. – P. 3923-3940. https://doi.org/10.1007/s10845-024-02403-5.
12. ASTM International. (2026). *ASTM F136-26:* Standard specification for wrought titanium-6aluminum-4vanadium ELI (extra low interstitial) alloy for surgical implant applications (UNS R56401). ASTM International. https://doi.org/10.1520/F0136-26.

Қаржыландыру: *Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетімен BR24992786 «Отандық медициналық құралдар мен медициналық мақсаттағы бұйымдардың үлгілерін дайындау технологиясын әзірлеу» бағдарламасын іске асыру шеңберінде қаржыландырылады.*

Алғыс білдіру: *Авторлар медициналық құрал-сайман бойынша пікірлер ұсынғаны, сондай-ақ сарапшылық кеңестері мен практикалық ұсынымдары үшін академик Н.Ж. Батпенов атындағы Ұлттық травматология және ортопедия ғылыми орталығына алғыс білдіреді.*

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық [5]
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

АДАПТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОРТИКАЛЬНЫХ КОСТНЫХ ВИНТОВ ИЗ СПЛАВА TI-6AL-4V НА СТАНКАХ С ЧПУ

Рассмотрена проблема обеспечения точности геометрических параметров кортикальных костных винтов из титанового сплава Ti-6Al-4V, изготавливаемых на станках с числовым программным управлением. Актуальность исследования обусловлена высокими требованиями к качеству медицинских имплантатов и необходимостью поддержания стабильности процесса образования резьбы в условиях накопленного износа режущего инструмента. Целью работы является разработка и экспериментальная проверка метода адаптивной компенсации износа резьбонарезной головки средствами системы ЧПУ. Исследования выполнены на базе Центра компетенций «Smart Engineering» Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева. Образцы изготавливались на автомате продольного точения MANURHIN K'MX 726 EVO, а контроль геометрических параметров резьбы осуществлялся с использованием контурографа Mahr MarSurf CD 140. Экспериментальная программа включала девять режимов обработки с максимальной накопленной длиной резания 57 м. Установлено, что с увеличением накопленной длины обработки наблюдаются систематические изменения шага резьбы, глубины профиля и углов боковых поверхностей. Разработана эмпирическая зависимость, определяющая величину корректирующего смещения инструмента в зависимости от накопленной длины обработки. Для максимальной исследованной наработки получено значение ΔZ = 0,0509 мм, практически совпадающее с реализованной компенсацией 0,050 мм. После введения расчётной коррекции отклонение шага резьбы составило 1,28 % относительно номинального значения 1,25 мм, что обеспечило сохранение стабильной геометрии резьбового профиля без замены инструмента. Практическая значимость работы заключается в повышении точности изготовления медицинских имплантатов, увеличении ресурса резьбонарезной головки и снижении производственных затрат. Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием систем автоматического мониторинга износа инструмента и внедрением алгоритмов адаптивной компенсации в интеллектуальные цифровые производственные системы.

Ключевые слова: *кортикальный костный винт, Ti-6Al-4V, износ режущего инструмента, адаптивная компенсация, эмпирическая зависимость, станки с ЧПУ, формообразование резьбы, медицинские имплантаты.*

К.К. Комбаев, Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, Р. Ғабдысалық
Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
070000, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Д.Серікбаев көшесі, 19
*e-mail: rgabdysalyk@edu.ektu.kz

ADAPTIVE CUTTING TOOL WEAR COMPENSATION IN CNC MANUFACTURING OF TI-6AL-4V CORTICAL BONE SCREWS

This study addresses the problem of ensuring the dimensional accuracy of cortical bone screws manufactured from Ti-6Al-4V titanium alloy using computer numerical control (CNC) machine tools. The relevance of the research is determined by the stringent quality requirements for medical implants and the need to maintain stable thread-forming conditions under progressive cutting tool wear. The aim of the study is to develop and experimentally validate a method for adaptive compensation of thread-cutting head wear using CNC system capabilities. The research was conducted at the Smart Engineering Competence Center of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. Experimental specimens were manufactured on a MANURHIN K'MX 726 EVO Swiss-type CNC lathe, while the thread geometry was evaluated using a Mahr MarSurf CD 140 contour measuring system. The experimental program comprised nine machining modes with a maximum accumulated cutting length of 57 m. The results showed that increasing accumulated machining length was associated with systematic changes in thread pitch, profile depth, and flank angles. An empirical linear relationship was obtained to estimate the required compensation offset within the investigated machining-length range. For the maximum investigated operating length, the calculated compensation value reached ΔZ = 0.0509 mm, which closely matched the implemented CNC compensation of 0.050 mm. After applying the calculated correction, the thread pitch deviation was limited to 1.28% relative to the nominal value of 1.25 mm, ensuring stable thread profile geometry without tool replacement. The practical significance of the proposed approach lies in improving the dimensional accuracy of medical implants, extending the effective service life of the thread-cutting head, and reducing manufacturing costs. Future research will focus on automated tool wear monitoring systems and the integration of adaptive compensation algorithms into intelligent digital manufacturing environments.

Key words: *cortical bone screw, Ti-6Al-4V, cutting tool wear, adaptive compensation, empirical model, CNC machining, thread profile generation, medical implants.*

Сведения об авторах

Куат Курганович Комбаев – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Международная школа инженерии, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Жақсылық Мұхаметбекұлы Мұхаметбек – докторант ОП - 8D07102 «Машиностроение», инженер-исследователь Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Багдат Нурланович Азаматов – PhD, Генеральный директор ТОО «SciMed», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Данияр Исатайулы Калиев – PhD, руководитель ЦК «Smart Engineering», Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Риза Ғабдысалық* – PhD, ассоциированный профессор, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9184-0897.

Авторлар туралы мәліметтер

Куат Курганович Комбаев – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық инженерия мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Жақсылық Мұхаметбекұлы Мұхаметбек – Докторант ББ – 8D07102 «Машина жасау» Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуші-инженер, Өскемен, Қазақстан; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Багдат Нурланович Азаматов – PhD, «SciMed» ЖШС бас директоры, Өскемен, Қазақстан; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Данияр Исатайұлы Қалиев – PhD докторы, «Smart Engineering» ҚО жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Риза Ғабдысалық* – PhD, қауымдастырылған профессор, Д.Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-9184-0897.

Information about the authors

Kuat Kombayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International School of Engineering, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6929-2748.

Zhaksylyk Mukhametbek – Doctoral student of the Educational Program 8D07102 «Mechanical Engineering» research engineer D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: ZhMukhametbek@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2196-010X.

Bagdat Nurlanovich Azamatov – PhD, CEO of the «SciMed», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6381-5846.

Daniyar Kaliyev – PhD, Head of Competence Center «Smart Engineering», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: dkaliyev@ektu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7281-2022.

Riza Gabdyssalyk* – PhD, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: riza.gabdyssalyk@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-9184-0897.

Редакцияға енуі 17.07.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.09.2026
Жариялауға қабылданды 14.09.2026