

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_2_10

XFTAP 55.21.99

ХИРУРГИЯЛЫҚ АСПАПТАРҒА АРНАЛҒАН 10X17H13M2 (AISI 316L АНАЛОГЫ) ТОТ БАСПАЙТЫН БОЛАТТЫҢ БЕТКІ ҚАБАТЫНЫҢ САПАСЫНА СЫМДЫ ЭЛЕКТРЭРРОЗИЯЛЫҚ ӨНДЕУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 10X17H13M2 (АНАЛОГ AISI 316L) ДЛЯ ХИРУРГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА

INFLUENCE OF WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PARAMETERS ON THE SURFACE LAYER QUALITY OF 10KH17N13M2 (AISI 316L ANALOG) STAINLESS STEEL FOR SURGICAL INSTRUMENTS

Ж.М. Мұхаметбек ¹, Б.Н. Азаматов ¹, Д.И. Қалиев ¹,
К.К. Комбаев ^{1*}, К.Е. Апбазов ¹

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

*Жауапты автор: Комбаев Куат Курганович, e-mail: kkombaev@edu.ektu.kz

Түйінді сөздер:

сымды
электрэррозиялық өңдеу,
10X17H13M2 болаты,
сүйек ұстағыш,
микроқұрылым,
микроқаттылық, беттің
кедір-бұдырлығы,
ақ қабат, энергия-
дисперсиялық талдау.

ТҮЙІНДЕМЕ

Зерттеудің өзектілігі сүйек тіндерімен жанасатын хирургиялық аспаптардың пайдалану сенімділігі мен биологиялық қауіпсіздігін арттыру қажеттілігімен негізделген. Коррозияға төзімді болаттарды өңдеудің дәстүрлі әдістері көбінесе беткі қабаттың сапасын төмендетеді, бұл электрофизикалық әдістерді қолдануды өзекті етеді. Жұмыстың мақсаты — сымды электрэррозиялық өңдеудің энергетикалық параметрлері мен 10X17H13M2 (AISI 316L аналогы) аустенитті болатының беткі қабатының сапасы арасындағы өзара байланысты орнату.

Зерттеу барысында растрлық электрондық микроскопия, энергия-дисперсиялық микроталдау, Виккерс бойынша микроқаттылықты өлшеу және беттің кедір-бұдырлығын бағалау әдістері қолданылды. Жұмыс нәтижелері импульстік режимдердің өзгеруі беттің құрылымдық тұтастығына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Төмен қарқынды режимдерде микрожарықшақтары бар және микроқаттылығы төмен (180–191 HV) ақаулы қабат қалыптасатыны анықталды. Оңтайландырылған режимді (ток 8 А) қолдану қабаттану белгілері жоқ біртекті модификацияланған қабат алуға, 198–204 HV деңгейіндегі тұрақты микроқаттылыққа және кедір-бұдырлықты (Ra 1,2–1,5 мкм дейін) төмендетуге мүмкіндік берді. Ғылыми жаңалық «ақ қабаттың» термиялық фрагментациясын болдырмайтын қалыптасу жағдайларын анықтауда жатыр.



© 2026 Ж.М. Мұхаметбек, Б.Н. Азаматов, Д.И. Қалиев, К.К. Комбаев, К.Е. Апбазов

Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Практикалық маңыздылығы сүйек ұстағыштарды дайындаудың аспаптардың жоғары коррозиялық төзімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ететін технологиялық регламенттерін негіздеуден тұрады. Болашақ зерттеулердің жолдары циклілік жүктеме кезінде аспаптардың шаршау беріктігіне электрэррозиялық өңдеудің әсерін зерттеумен байланысты.

Ключевые слова:

проволочная
электроэрозионная
обработка, сталь
10X17N13M2,
костедержатель,
микроструктура,
микротвердость,
шероховатость
поверхности, белый слой,
энергодисперсионный
анализ

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надежности и биологической безопасности хирургического инструментария, контактирующего с костными тканями. Традиционные методы механической обработки коррозионностойких сталей часто приводят к наклепу и снижению качества поверхности, что делает перспективным применение электрофизических методов. Целью работы является установление взаимосвязи между энергетическими параметрами проволочной электроэрозионной обработки и качеством поверхностного слоя аустенитной стали 10X17N13M2 (аналог AISI 316L).

В ходе исследования использованы методы растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного микроанализа, измерения микротвердости по Виккерсу и профилометрии для оценки параметров шероховатости. Результаты работы показали, что варьирование импульсных режимов критически влияет на структурную целостность поверхности. Установлено, что при низкоинтенсивных режимах формируется дефектный слой с микротрещинами и сниженной микротвердостью (180–191 HV). Применение оптимизированного режима (ток 8 А) позволило получить однородный модифицированный слой без признаков расслоения, со стабильной микротвердостью 198–204 HV и снижением шероховатости (R_a до 1,2–1,5 мкм). Научная новизна заключается в определении условий формирования «белого слоя», исключающих его термическую фрагментацию. Практическая значимость работы состоит в обосновании технологических регламентов изготовления сүйек ұстағыш (костедержателей), обеспечивающих высокую коррозионную стойкость и долговечность инструментов. Пути будущих исследований связаны с изучением влияния электроэрозионной обработки на усталостную прочность инструментов при циклическом нагружении.

keywords:

wire electrical discharge
machining, 10Kh17N13M2
steel, bone holder,
microstructure,
microhardness, surface
roughness, white layer,
energy-dispersive X-ray
spectroscopy.

ABSTRACT

The relevance of this study is driven by the necessity to enhance the operational reliability and biological safety of surgical instruments that come into contact with bone tissues. Traditional machining methods for corrosion-resistant steels often lead to work hardening and degraded surface quality, making the application of electrophysical processing methods highly promising. The objective of the work is to establish the correlation between the energy parameters of wire electrical discharge machining and the surface layer quality of 10Kh17N13M2 (AISI 316L analog) austenitic steel.

The research methods included scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, Vickers microhardness testing, and profilometry for surface roughness evaluation. The results indicated that varying the pulse regimes critically affects the structural integrity of the surface. It was established that low-intensity regimes form a defective layer characterized by microcracks and reduced microhardness (180–191 HV). The application of an optimized regime (8 A current) enabled the

formation of a homogeneous modified layer without signs of delamination, featuring a stable microhardness of 198–204 HV and a reduction in roughness (R_a to 1.2–1.5 μm). The scientific novelty lies in determining the specific conditions for "white layer" formation that prevent its thermal fragmentation. The practical significance of the work consists in the justification of technological regulations for manufacturing bone holders, ensuring high corrosion resistance and durability of the instruments. Future research directions are associated with studying the impact of electrical discharge machining on the fatigue strength of instruments under cyclic loading conditions.

КІРІСПЕ

Жоғары технологиялық медицинаның қазіргі дамуы хирургиялық аспаптардың, әсіресе травматология мен ортопедия саласындағы бұйымдардың сапасы мен төзімділігіне қатаң талаптар қояды (Bruns et al., 2007). Остеосинтез — сынықтардан кейін сүйек фрагменттерінің тұтастығын хирургиялық жолмен қалпына келтіру операцияларының сәтті өтуін қамтамасыз ететін негізгі құралдардың бірі сүйек ұстағыш болып табылады (1-сурет). Оның функционалдық мақсатының ерекшелігі биологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін механикалық беріктіктің, коррозияға төзімділіктің және беткі қабаттың мінсіз сапасының ерекше үйлесімін талап етеді (Niinomi, 2008).

Бұл зерттеудің нысаны — 3D-моделі 1-суретте көрсетілген сүйек ұстағыш қысқышы. Мұндай бұйымдарды дайындау үшін материал ретінде 10X17H13M2 (AISI 316L аналогы) маркалы аустенитті коррозияға төзімді болатты қолдану стратегиялық тұрғыдан негізделген. Молибденмен легирленуінің арқасында бұл қорытпа хлоридті орталар мен биологиялық сұйықтықтарда питтингтік коррозияға жоғары төзімділік көрсетеді, бұл бірнеше мәрте стерилизациялау және тірі тіңдермен ұзақ жанасу кезіндегі шешуші фактор болып табылады (Zhang et al., 2025). Дегенмен, аустенитті болаттарға тән жоғары пластикалық пен қатаюға (наклеп) бейімділік дәстүрлі жүзді өңдеу әдістерінің тиімділігін айтарлықтай шектейді, бұл өнімділіктің төмендеуіне және өндіріс құнының жоғарылауына әкеледі.



1-сурет. Электрэррозиялық кесу процесін дайындауға арналған 10X17H13M2 болатынан жасалған сүйек ұстағыштың геометриялық моделі

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Осыған байланысты, күрделі профильді аспаптарды өндіруде сымды электрэррозиялық кесу (Wire Electrical Discharge Machining – WEDM) технологиясын қолдану басымдыққа ие болуда. Бұл әдіс тікелей механикалық жанасусыз бөлшектерді жоғары дәлдікпен алуға мүмкіндік береді, бұл дайындаманың деформациялануын болдырмайды. Соған қарамастан, WEDM процесі күрделі жылу-физикалық құбылыстармен қатар

жүреді: разрядтардың жоғары температуралық әсері термиялық өзгерген «ақ қабаттың» қалыптасуына, сондай-ақ микрократерлер мен термиялық микрожарықшақтардың пайда болуына әкеледі. Аталған ақаулардың болуы аспаптың пайдалану қасиеттерін сақтау үшін өңдеу режимдерін мұқият негіздеуді талап етеді (Anil et al., 2023).

Wu et al. (2018) зерттеулері тот баспайтын болат бетінің морфологиясы мен нано-кедір-бұдырлығы бактериялардың алғашқы адгезиясына және микроколониялардың түзілуіне айтарлықтай әсер ететінін растайды. Кедір-бұдырлық параметрлерінің (R_a , R_z) артуы жанасудың нақты ауданының ұлғаюы және адгезия орталықтары рөлін атқаратын микро-кедір-бұдырлардың болуы есебінен микроорганизмдердің неғұрлым қарқынды бекуіне ықпал ететіні көрсетілген. Осыған байланысты аспаптың функционалдық сенімділігі беткі қабаттың күйімен тікелей анықталады. Кедір-бұдырлық параметрлері бұйымның пайдалану сипаттамаларын ғана емес, сонымен қатар микробтық контаминация қаупін және кейінгі дезинфекцияның тиімділігін де айқындайды. Өз кезегінде, Wegener et al. (2017) жұмыстары механикалық өңдеу кезінде беткі қабат сапасының қалыптасуы технологиялық әсер ету режимдерімен және өңдеу процесінің сипаттамаларымен, соның ішінде материалды алу параметрлерімен және микрорельефтің қалыптасу жағдайларымен анықталатынын көрсетеді. Микро-кедір-бұдырлар мен беткі ақаулардың бақылаусыз дамуы беттің тұтастығының нашарлауына және кедір-бұдырлықтың өсуіне әкеледі, бұл 10X17H13M2 болаты бетінің берілген параметрлерін қамтамасыз ету үшін технологиялық режимдерді дәл оңтайландыруды талап етеді. Қазіргі зерттеулердің нәтижелері электрэррозиялық өңдеу кезінде процесс өнімділігі мен қалыптасатын беттің сапасы арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз ету көпфакторлы және сызықтық емес міндет екенін айғақтайды.

Но мен Newman (2003) және Chu et al. (2005) жұмыстарында айтарлықтай қалыңдықтағы (10 мм және одан жоғары) дайындамаларды өңдеу кезінде негізгі технологиялық параметрлер — ток күші (I), импульс ұзақтығы (T_{on}) және үзіліс ұзақтығы (T_{off}) – термиялық әсер ету аймағының қалыптасуына күрделі сызықтық емес әсер ететіні көрсетілген.

Бұл ретте разрядтың энергетикалық сипаттамаларының өзгеруі термиялық өзгерген қабат тереңдігінің айтарлықтай өзгеруіне әкеледі, бұл жылулық әсердің қарқындылығымен және материалдың жергілікті балқу және кристалдану жағдайларымен тікелей байланысты. Электрэррозиялық өңдеу кезінде процесс өнімділігі мен қалыптасатын беттің сапасы арасындағы оңтайлы арақатынасты қамтамасыз ету көпфакторлы және сызықтық емес міндет екені анықталды. Świercz бен Holubek (2020) және Huang et al. (2015) жұмыстарында бірлі-жарым электр разряды энергиясының артуы жергілікті балқу және материалдың кейінгі жылдам кристалдану процестерінің күшеюіне әкелетіні, бұл «ақ қабаттың» (*recast layer*) қалыптасуымен және оның қалыңдығының өсуімен қатар жүретіні көрсетілген. Энергетикалық әсердің артуы термиялық өзгерген беткі қабат қалыңдығының өсуін тудырады, бұл микроақаулардың дамуына және қалдық кернеулердің пайда болуына, сондай-ақ материалдың беткі құрылымының тұтастығының нашарлауына әкеледі.

Зерттеушілер кіші диаметрлі (0,18 мм) латуньді электр-сыммен үйлесімде су негізіндегі диэлектрлік орталарды қолдануға ерекше назар аударады. Мұндай жағдайлар эрозия өнімдерін тиімді шығаруды қамтамасыз етеді, алайда Raghunath (2018) атап өткендей, сымды бірнеше рет қайта орайтын станоктардағы (DK77 типіндегі) режимдердің өзгермелілігі әрбір нақты болат маркасы үшін қосымша верификацияны талап етеді. Mao et al. (2025) жақында жүргізген зерттеулерінде іске асырылған статистикалық талдау және көпкритерийлі оңтайландыру әдістерін қолдануға қарамастан, күрделі пішінді аспаптарды дайындау кезінде 10X17H13M2 болаты бетінің микрогеометриясының қалыптасу мәселесі жеткіліксіз зерттелген күйінде қалып отыр.

Бұл жұмыстың мақсаты — WEDM режимдері мен беткі қабат сапасының параметрлері арасындағы ғылыми негізделген тәуелділіктерді орнату, бұл хирургиялық сүйек ұстағыштардың халықаралық биологиялық қауіпсіздік стандарттарына және пайдалану сенімділігіне сәйкестігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ЗЕРТТЕУ ӘДІСТЕРІ

Жұмыстың эксперименттік бөлімі Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің «Smart Engineering» құзыреттілік орталығының базасында іске асырылды. Сүйек ұстағышты (костедержатель) дайындау үшін конструкциялық материал ретінде (ГОСТ 5632–2014, 2014) стандарты бойынша регламенттелген 10X17H13M2 маркалы аустенитті коррозияға төзімді болат пайдаланылды. Бұл қорытпа AISI 316L (ASTM A240) болатының ең жақын техникалық аналогы болып табылады және өзінің электрохимиялық коррозияға жоғары төзімділігі мен биоүйлесімділігі арқасында биомедициналық өнеркәсіпте кеңінен қолданылады.

Бұл болат маркасын таңдау құралдың циклдік стерилизациялау және агрессивті орталармен жанасу жағдайларында ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету қажеттілігіне негізделген. Оптикалық-эмиссиялық спектрлік талдау әдісімен расталған зерттелетін материалдың химиялық құрамы 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте. 10X17H13M2 болатының және AISI 316L аналогының
номиналды химиялық құрамы

Стандарт (Марка)	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Fe
ГОСТ 5632-2014 (10X17H13M2)	≤0,10	16,0–18,0	12,0–14,0	2,0–3,0	≤2,0	≤0,8	≤0,035	≤0,02	Herizi
ASTM A240 (AISI 316L)	≤0,03	16,0–18,0	10,0–14,0	2,0–3,0	≤2,0	≤0,75	≤0,045	≤0,03	Herizi
Ескерту – авторлармен құрастырылды									

Ескерту – Элементтердің мөлшері массалық пайызбен (wt. %) берілген.

Сүйек ұстағышты өндіру процесі кері инжиниринг әдістерін қолданудан басталған дәлдігі жоғары (прецизионды) операциялар циклін қамтыды. Физикалық прототипті цифрландыру ZG RigelScan Plus портативті лазерлік 3D-сканерінің көмегімен жүзеге асырылды (метрологиялық дәлдігі 0,02 мм-ге дейін). Алынған нүктелер жиынтығы («облако точек») жоғары дәлдіктегі CAD/CAM модельдерін жасауға негіз болды.

10X17H13M2 болатынан дайындалған дайындамаларды алдын ала механикалық өңдеу DMU50 (DMG MORI) бес осьті өңдеу орталығында жүргізілді, бұл электр эрозиялық кезең алдында базалаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етті (Doudkin және т.б., 2020). Құралдың функционалдық элементтерін прецизионды кесудің негізгі кезеңі су негізіндегі диэлектрлік ортада латунь сымын (Ø 0,18 мм) көп мәрте қайта орау жүйесі бар DK7745 станогінде орындалды.

Сүйек ұстағыштың ең жауапты бөліктеріне — остеосинтез процесінде сүйек тінімен тікелей жанасатын тісті еріншелерді (губки) өңдеуге ерекше көңіл бөлінді. Технологияны пысықтау үшін сынақ кесінділері жасалды (2-сурет), бұл СББ (ЧПУ) басқару бағдарламасын верификациялауға және дайындама қалыңдығы 12 мм болған кездегі процестің тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік берді.

Энергетикалық режимдердің 10X17H13M2 болаты бетінің сапасына әсер ету заңдылықтарын анықтау үшін Тагучи ортогоналды матрицасы негізінде толық факторлы

эксперимент іске асырылды. Құрал-саймандық электрод ретінде диаметрі 0,18 мм, созылу кезіндегі беріктік шегі 2511 Н/мм² молибден сымы қолданылды, бұл қалыңдығы Н=12 мм дайындамаларды өңдеу кезінде кесу траекториясының жоғары тұрақтылығын қамтамасыз етті.



2-сурет. Сымды электр эрозиялық кесуден кейінгі сүйек ұстағыштың жауапты элементтерінің эксперименттік үлгілері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Диэлектрлік орта ретінде дистилденген сумен 1:45 пропорциясында сұйылтылған, жоғары технологиялық EDM-JR-3A-GEL концентраты негізіндегі эмульсия пайдаланылды. Антикоррозиялық және тозуға қарсы қоспалары бар қатты сабын негізіндегі бұл құрам эрозия өнімдерін (шламды) тиімді шығаруға және токтың орташа мәндерінде тұрақты ұшқын аралығын сақтауға кепілдік береді.

Эксперименттердің жалпы жиынтығынан процестің маңызды нүктелерін сипаттайтын екі негізгі режим бөліп көрсетілді (2-кесте): фиништік өңдеу (ақауларды азайту) және өнімді кесу. Беткі қабат морфологиясын және термиялық әсер ету аймағындағы құрылымдық өзгерістерді кешенді зерттеу «VERITAS» басымдық орталығының Аналитикалық зерттеулер зертханасы базасында жүргізілді (Комбаев және т.б., 2025a).

2-кесте. Сүйек ұстағыш элементтерін сымды электр эрозиялық кесудің технологиялық режимдері

Өңдеу параметрі	Өлшем бірлігі	№ 1 режим (Фиништік)	№ 2 режим (Өнімді)
Дайындама қалыңдығы (Н)	мм	12	12
Импульс ұзақтығы (Ton)	мкс	32	40
Үзіліс ұзақтығы (Toff)	мкс	12	7
Жұмыс кернеуі (U)	В	65	65
Орташа ток (I)	А	5	8
Сым түрі	—	Mo (Ø 0,18 мм)	Mo (Ø 0,18 мм)
Жұмыс ортасы (С салқындатқыш сұйықтық)	—	EDM-JR-3A-GEL	EDM-JR-3A-GEL
<i>Ескерту – авторлармен құрастырылды</i>			

Өзгерген қабаттың тереңдігін бағалау және көлденең шлифтердің микроқұрылымын талдау үшін LaboForce-3 құрылғысы бар LaboPol-5 (Struers, Дания) автоматтандырылған жүйесін пайдалана отырып, жоғары дәлдікті проба дайындау жұмыстары орындалды. Фиништік жылтырату механикалық әсер ету артефактілерінің болмауын қамтамасыз етті. 10X17H13M2 болатының микроқұрылымын анықтау үшін азот қышқылының 5 %-дық

ерітіндісімен химиялық өңдеу (травление) қолданылды. Кесу аймағын визуализациялау BX-51 (Olympus, Жапония) зерттеу микроскобында 1000 есеге дейінгі үлкейтумен жүзеге асырылды. Бақылаулар ашық және қараңғы өріс режимдерінде, сондай-ақ поляризацияланған жарықта жүргізілді, бұл термиялық әсер ету аймағындағы түйіршіктер шекарасын және фазалық құрамды егжей-тегжейлі сәйкестендіруге мүмкіндік берді (Kombayev және т.б., 2025b).

Беткі қабат топографиясын, микрократерлер параметрлерін және элементтердің таралуын прецизионды зерттеу JSM-6390LV (JEOL Ltd., Жапония) микроскобында растрлық электрондық микроскопия (РЭМ) әдісімен орындалды. Зерттеулер 30 кВ-қа дейінгі үдеткіш кернеуде және 3 нм-ге дейінгі ажырату қабілеттілігімен жүргізілді, бұл 300 000 есеге дейінгі үлкейтуде кескіндердің жоғары айқындылығын қамтамасыз етті.

Нүктелік аймақтардағы элементтік құрамды сандық бағалау және кесу сызығының бойымен легирлеуші компоненттердің таралу профильдерін құру үшін INCA Energy Penta FET X3 (Oxford Instruments, Ұлыбритания) энергия-дисперсиялық микроталдау жүйесі пайдаланылды. Детектордың жоғары энергетикалық ажырату қабілеті (137 эВ) бордан (В) уранға (U) дейінгі диапазондағы элементтерге сапалық және сандық талдау жүргізуге мүмкіндік берді. Диэлектрлік қоспалар мен эрозия өнімдерін зерттеу кезінде артефактілерді болдырмау үшін түсірілім төмен вакуум режимінде жүргізілді. Таңдалған учаскелерде элементтердің таралу карталарын құру (mapping) химиялық құрамның біртектілігін тексеруге және электрод материалының (латунь/молибден) құралдың беткі қабатына диффузиялану дәрежесін бағалауға мүмкіндік берді.

Үлгілердің микроқаттылығы DuraScan-20 (EMCO TEST, Австрия) микроқаттылық өлшегішінің көмегімен Виккерс әдісімен анықталды. Сынақтар 1 кг (HV1) жүктемемен, максималды жүктемеде 10 секунд ұстаумен жүргізілді, бұл тұрақты таңбаның қалыптасуын және материалдың серпімді қалпына келуінің әсерін азайтуды қамтамасыз етті. Өлшеулер пластикалық деформация аймақтарының өзара әсерін болдырмау үшін көршілес таңбалар арасында 1,0 мм қадаммен орындалды. Нәтижелердің сенімділігін арттыру үшін әр серияда бірнеше өлшеу жүргізіліп, алынған мәндердің орташа көрсеткіші есептелді.

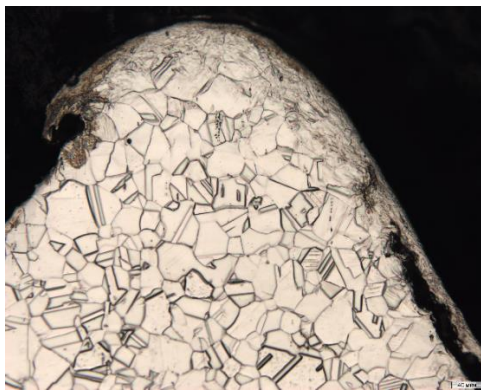
Бетінің кедір-бұдырлық параметрлерін (R_a және R_z) өлшеу PHT 350Lt зонды (ұзындығы 4,8 мм) бар MarSurf PS 10 портативті профилометрдің көмегімен жүргізілді. Өлшеулер контактілі профильдеу әдісімен, 2,5 мкм базалық кесу ұзындығында, ± 200 мкм биіктік диапазонында және зондтың 1,0 мм/с қозғалыс жылдамдығында орындалды. Әрбір профиль үшін 9600-ге дейін нүкте тіркелді. Алынған R_a және R_z мәндері бірнеше өлшеулер бойынша орташаланды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

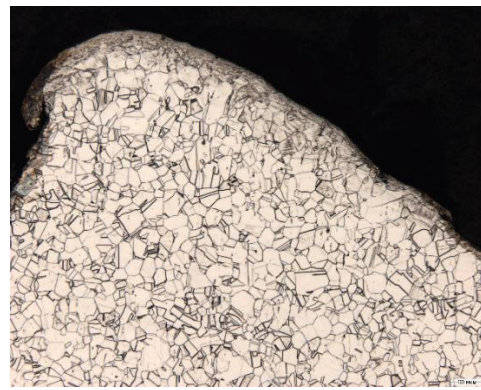
Екі түрлі режимде сымды электр эрозиялық кесуден (WEDM) кейінгі сүйек ұстағыш жұмыс элементтерінің көлденең қималарын металлографиялық зерттеу нәтижелері 3-суретте көрсетілген.

3, а-суретте (№ 1 режим: $T_{on}=32$ мкс, $T_{off}=12$ мкс) 10X17H13M2 болатының бастапқы күйіне тән орташа түйіршікті өлшемі бар бастапқы аустенитті матрица (γ -Fe) визуализацияланады. Полиэдральды түйіршіктердің ішінде айқын күйдіру қосарлануларының (двойники отжига) болуы құрылымдық біртектіліктің жоғары деңгейін және бастапқы кернеулердің төмендігін көрсетеді. Дегенмен, кесу аймағында микроқұрылымның шұғыл градиенті байқалады: тікелей беткі қабаттың астында жылу қайтару векторының (dT/dx) бойымен бағытталған бағаналы кристаллиттер түзіледі, бұл жылу ағынының жоғары локальды тығыздығын білдіреді.

Негізгі морфологиялық ерекшелік — сұйық фазадан ($>1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) өте жылдам шынықтыру нәтижесінде пайда болған гетерогенді «ақ қабаттың» (White Layer) қалыптасуы. Салқындатудың жоғары жылдамдығы ($106\text{--}107\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) салдарынан бұл қабатта жоғары температуралы дельта-ферриттің ($\delta\text{-Fe}$) және негізінен түйіршіктер шекарасында шоғырланған Cr_{23}C_6 типті хром карбидтерінің бөлінуі тіркеледі. №1 режимнің ең қауіпті ақауы – тіс ұштарындағы модификацияланған қабаттың когезиялық қабыршақтануы мен фрагментациясы (бөлшектенуі). Бұл феномен икемділігі төмен негізгі металлдағы «қабықтың» термиялық шөгуді нәтижесінде айтарлықтай созылу қалдық кернеулерінің (σ_{res}) пайда болуымен түсіндіріледі. Ашық микрожарықтар мен деламинация аймақтарының түзілуі патогенді микрофлораның адгезиясына (жабысуына) жағдай жасайды, бұл құралдың пайдалану кезіндегі биоқауіпсіздігін айтарлықтай төмендетеді.



а) Режим №1



б) Режим №2

3-сурет. Электр эрозиялық кесуден кейінгі 10X17H13M2 болатынан жасалған сүйек ұстағыш тістерінің көлденең қимасының микроқұрылымы

Ескерту – авторлармен құрастырылды

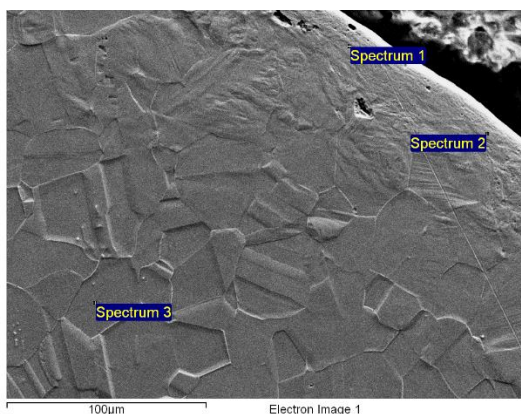
Бұған керісінше, № 2 режимде ($T_{\text{on}}=40\text{ мкс}$, $T_{\text{off}}=7\text{ мкс}$, 3б-сурет) алынған үлгінің микроқұрылымы аустенитті матрицаның неғұрлым дисперсті морфологиясымен сипатталады. Беткі қабат астындағы қабаттарда түйіршік өлшемінің кішіреюі жылу-физикалық тепе-теңдіктің өзгеруіне байланысты: импульстердің жоғары жиілігі мен қысқартылған үзіліс кристаллизация орталықтары санының артуына ықпал етеді, бұл γ -фаза түйіршіктерінің өсуін тежейді.

№ 2 режимдегі бетке жақын қабатты визуалды талдау құрылымдық тұтастықтың айтарлықтай артқанын көрсетеді. Термиялық өзгерген қабаттың матрицамен когерентті түйісуі байқалады, бұл ретте когезиялық үзілістер дерлік кездеспейді. Бұл әсер қалдық кернеулердің қалыптасу динамикасының тұрақтануымен түсіндіріледі: 8 А ток күші мен қысқартылған салқындату аралығында балқыманың неғұрлым біртекті аймағы дискретті емес түрде сұиды, бұл фазааралық шекаралардағы созылу кернеулерінің пиктік мәндерін минималдайды. № 2 режимдегі модификацияланған қабаттың фазалық құрамы да δ -Fe және Cr_{23}C_6 жоғары дисперсті бөлінділерімен берілген, бірақ олардың біркелкі таралуы және айқын фрагментацияның болмауы геометриялық тұрғыдан тұрақты профильдің қалыптасуына ықпал етеді. Осылайша, разрядтың жоғары энергетикасына қарамастан, №2 режим ақаулық деңгейі төмен беттің жасалуын қамтамасыз етеді, бұл хирургиялық құралдардың коррозияға төзімділігі мен механикалық беріктігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады.

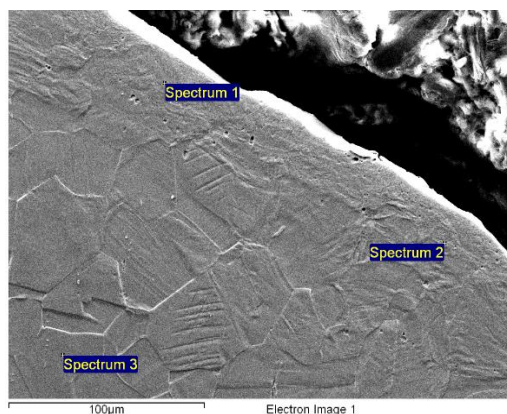
WEDM энергетикалық параметрлерінің 10X17H13M2 болатының элементтік құрамы мен құрылымдық тұтастығына әсерін верификациялау үшін бетке жақын қабаттарға

жоғары дәлдікті микроталдау жүргізілді. РЭМ-морфология нәтижелері мен сандық талдау нүктелері 4-суретте, ал сандық мәндер 3 және 4-кестелерде көрсетілген.

№ 1 режимде (Топ=32мкс, I=5 А) алынған үлгіні зерттеу төмен қарқынды режимдерге тән модификацияланған қабаттың деламациясын (қабаттануын) анықтады (4, а-сурет). «Ақ қабат / аустенитті матрица» фазааралық шекарасында байқалатын когезиялық үзіліс туындаған созылу қалдық кернеулерінің деңгейі шынықтырылған фазаның локальды беріктік шегінен асқанын көрсетеді. Бұл әсер электр эрозиялық кесудің ерекшелігімен негізделген: диэлектрлік ортада өте жылдам салқындату жағдайында (106–107 °С/с жылдамдықпен) термиялық кеңеюдің (α) шұғыл градиенті пайда болады. Нәтижесінде беткі жоғары көміртекті «қабық» тұтқыр төсеммен адгезиялық байланысын жоғалтады, бұл құралдың жұмыс жиектерінің фрагментациясына әкеледі.



а) Режим №1



б) Режим №2

4-сурет. Кесу бетінің РЭМ-кескіндері және микроталдау аймақтары

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Spectrum 1 және 2 («ақ қабат») нүктелеріндегі сандық ЭДС-талдау нәтижелері (3-кесте) хромның (17,43–17,56 % салмақ) және молибденнің (2,15–2,41 % салмақ) негізгі концентрацияларының сақталатынын растайды. Кремний (Si) мен марганец (Mn) деңгейлері ГОСТ 5632-2014 номиналды мәндерімен сәйкес келеді, бұл жоғары температуралы плазмалық разрядтың әсерінен легирлеуші компоненттердің селективті жанып кетпеуін көрсетеді. Модификацияланған қабаттағы молибден мөлшерінің тұрақтылығы – материалдың агрессивті хлоридті биологиялық орталарда питтингке төзімділігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады.

3-кесте. Өңдеу аймағындағы 10X17H13M2 болатының элементтік құрамы (№1 режим)

Spectrum	In stats.	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	2.38	0.68	17.43	1.86	65.86	9.64	2.15	100.00
Spectrum 2	Yes	2.54	0.68	17.56	1.43	66.28	9.11	2.41	100.00
Spectrum 3	Yes	0.56	0.71	17.27	1.70	66.30	11.34	2.11	100.00

Ескерту – авторлармен құрастырылды

№ 1 режимде беткі қабаттың морфологиялық тұтастығының бұзылуына қарамастан, қорытпаның элементтік негізі тұтастай алғанда тұрақтылықты сақтайды. Дегенмен, салыстырмалы талдау көрсеткендей, аустенитті матрицадағы (Spectrum 3) никель мөлшері 11,34 % салмақты құраса, ал термиялық әсер ету аймағында (Spectrum 1, 2) оның салмағы

9,11–9,64 %-ға дейін төмендеуі байқалады. Мұндай концентрациялар градиенті WEDM-нің экстремалды жылулық әсері жағдайындағы диффузиялық процестер мен беткі қабаттың термиялық деструкциясынан туындаған локальды химиялық біртекті еместіктің пайда болғанын көрсетеді.

№ 2 режимге ($T_{on}=40$ мкс, $I=8$ А) аусу беткі қабат күйінің сапалық трансформациясына иінірткі болды. РЭМ-микрофотографиясы (4, б-сурет) № 1 режимге тән фрагментация немесе деламинация белгілері мүлдем жоқ, кеуектілігі минималды, тығыз әрі біртекті модификацияланған қабаттың қалыптасқанын тіркейді. ЭДС-талдау мәліметтеріне сәйкес (4-кесте), бұл режимде Spectrum 1 және 2 нүктелеріндегі Cr және Ni концентрациясы тиісінше 17,41–17,53 % және 9,79–9,84 % салмақты құрайды.

Модификацияланған қабаттағы никельдің матрицаға (10,23 % салмақ) қатысты неғұрлым біркелкі таралуы импульстің оңтайландырылған параметрлері кезінде аустенитті фазаның (γ -Fe) жоғары термодинамикалық тұрақтылығын растайды. Беткі қабаттың молибденмен 2,67 % салмаққа дейін локальды байытылуы электрод материалының балқымаға ішінара аусуын көрсетеді, бұл материалдың питтингтік коррозияға төзімділігін қосымша күшейтеді. Алынған нәтижелер №2 режимдегі параметрлердің өзгеруі хирургиялық құралды пайдалану кезінде локальды бұзылу қаупін азайтатын, құрылымдық тұтас барьерлік қабаттың қалыптасуына ықпал ететінін дәлелдейді.

4-кесте. Өңдеу аймағындағы 10X17H13M2 болатының элементтік құрамы (№2 режим)

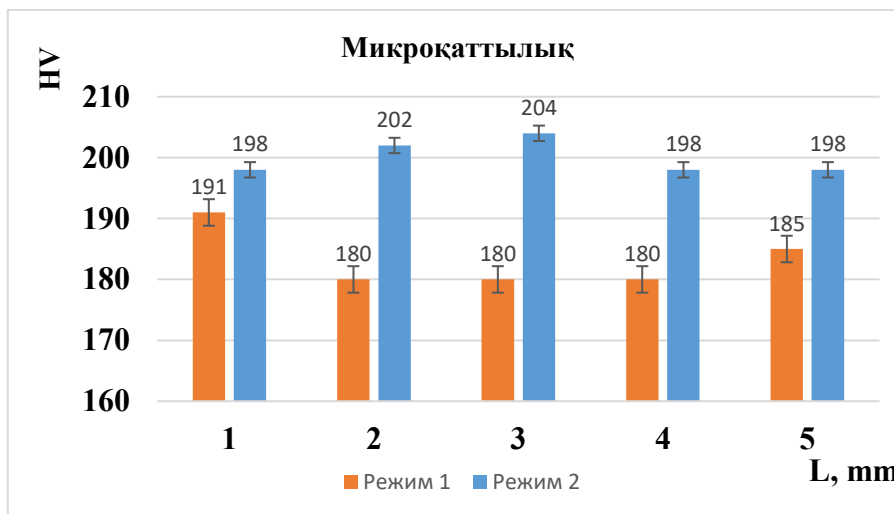
Spectrum	In stats.	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total
Spectrum 1	Yes	1.36	0.66	17.53	1.54	66.76	9.79	2.36	100.00
Spectrum 2	Yes	1.47	0.72	17.41	1.41	66.49	9.84	2.67	100.00
Spectrum 3	Yes	0.32	0.53	17.70	1.38	67.70	10.23	2.14	100.00
Ескерту – авторлармен құрастырылды									

№ 2 режимдегі элементтік профильдің принципіалды айырмашылығы – модификацияланған қабаттағы оттегінің (O) массалық үлесінің 1,36–1,47 % салмаққа дейін айтарлықтай төмендеуі болып табылады, бұл №1 режимнің көрсеткіштерінен (2,38–2,54 % салмақ) екі есеге жуық төмен. Бастапқы матрицадағы оттегінің фондық мөлшерін (0,32–0,56 % салмақ) ескерсек, анықталған заңдылық жоғары температуралық тотығу процестерінің тиімді тежелгенін көрсетеді.

Үзілістің қысқаруы ($T_{off}=7$ мкс) есебінен қол жеткізілген электродаралық саңылаудағы гидродинамиканы оңтайландыру эрозия өнімдерінің қарқынды шығарылуын қамтамасыз етеді және балқыманың сулы ортамен жанасу уақытын азайтады. Бұл механизм когезиялық сипаттамалары жоғары және металл емес оксидті қоспалардың мөлшері төмен ювенильді таза беттердің қалыптасуына ықпал етеді, бұл медициналық құралдардың коррозияға төзімділігін қамтамасыз етудің шешуші факторы болып табылады. Spectrum 3 нәтижелері құрал-саймандық электрод (Мо-сымы) материалының бақылаусыз диффузиялық аусуының болмайтынын растайды, ал токтың 8 А-ға дейін күшейтілуі болаттың химиялық құрамының деградациясына әкелмейді. Осылайша, №2 режим пайдалану қауіпсіздігі талаптарына жауап беретін, химиялық тұрақты және құрылымдық тұтас беткі қабаттың жасалуына кепілдік беретін оңтайлы режим болып табылады.

WEDM энергетикалық параметрлерінің материалдың механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау үшін өңдеу аймағында микроқаттылықты талдау жүргізілді. Өлшенген мәндер (5-сурет) №2 режимде ($T_{on}=40$ мкс, $I=8$ А) микроқаттылықтың неғұрлым біркелкі таралғанын және 198–204 HV диапазонында ауытқитынын көрсетеді. Максималды мәндер

(204 HV-ге дейін) тікелей кесу жиегінде тіркелді, бұл металлографиялық зерттеу кезінде анықталған тығыз модификацияланған қабаттың қалыптасуын растайды. Сонымен қатар, №1 режим ($T_{on}=32$ мкс, $I=5$ А) 180-нен 191 HV-ге дейінгі ауытқулары бар тұрақсыз қаттылық профилін көрсетеді. Бірқатар өлшеу нүктелеріндегі көрсеткіштердің мұндай төмендеуі бұрын анықталған ақаулармен тікелей байланысты: микрожарықтар мен «ақ қабаттың» деламация аймақтарының болуы материалдың индентордың енуіне тиімді қарсылығын төмендетеді, бұл беттің құрылымдық байланысының бұзылғанын көрсетеді.

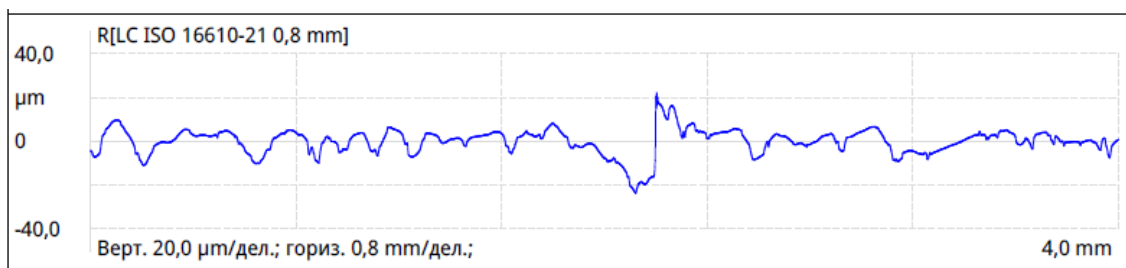


5-сурет. WEDM-нің әртүрлі режимдері үшін 10X17H13M2 болатының бетке жақын қабатында Виккерс бойынша микроқаттылықтың (HV) таралуы

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Алынған нәтижелерді күйдірілген күйдегі 10X17H13M2 маркалы болат үшін ГОСТ 5632-2014 нормативтік талаптарымен (оның типтік қаттылық мәндері шамамен 200 HV құрайды) салыстыру кезінде келесі заңдылықтар анықталды. №2 режимнің көрсеткіштері ГОСТ-тың эталондық мәндеріне толықтай сәйкес келеді, бұл құралдың конструкциялық беріктігінің сақталғанын және оңтайландырылған импульстік әсер кезінде матрицаның термиялық беріктігін жоғалтпағанын (разупрочнение) дәлелдейді. Керісінше, №1 режимде стандарт талаптарынан төмендеу жағына қарай (180 HV-ге дейін) ауытқу байқалады, бұл хирургиялық құралдар үшін шешуші фактор болып табылады. Қаттылықтың ГОСТ-тағы маркалық деңгейден төмендеуі беткі қабаттың жоғары ақаулығымен ұштасып, №1 режимді жарамсыз етеді, өйткені бұл сүйекпен жанасу кезінде жұмыс тістерінің тез деградациясына әкеледі. Осылайша, тек №2 режим ғана механикалық сипаттамалары медициналық өнеркәсіп стандарттарына толық жауап беретін беткі қабаттың алынуын қамтамасыз етіп, сүйек ұстағыштың бекітілу сенімділігі мен ұзақ мерзімділігіне кепілдік береді.

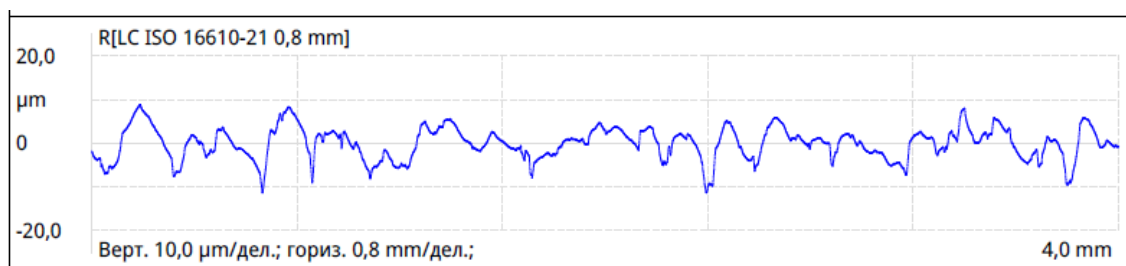
Кедір-бұдырлықтың сандық мәндерін талдау (6 және 7-суреттер) бұрын анықталған заңдылықтарды растайды. №1 режим үшін (6-сурет) орташа арифметикалық кедір-бұдырлық $Ra \approx 3,2-3,5$ мкм шамасын құрайды, бұл ретте Rz параметрі $\approx 18-22$ мкм-ге жетеді, бұл айқын шыңдары мен ойықтары бар ірі микрорельефтің қалыптасқанын көрсетеді. Мұндай мәндер беткі қабаттың жоғары ақаулығын білдіреді және қаттылықтың ~ 180 HV-ге дейін төмендеуімен сәйкес келеді.



6-сурет. №1 режимде өңдеу кезіндегі Ra және Rz беткі қабат кедір-бұдырлығы параметрлерінің мәндері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

№2 режим жағдайында (7-сурет) кедір-бұдырлық параметрлерінің айтарлықтай төмендеуі байқалады: Ra мәні $\approx 1,2\text{--}1,5$ мкм диапазонында, ал Rz — $\approx 8\text{--}10$ мкм аралығында. Алынған мәндер тегіс емес биіктіктері аз, неғұрлым біртекті және тегістелген бетті сипаттайды. №1 режиммен салыстырғанда кедір-бұдырлықтың Ra параметрі бойынша 2 еседен астам, ал Rz бойынша шамамен 2 есе төмендеуі өңдеу процесінің тұрақтанғанын және айқын термиялық зақымданулардың жоқтығын растайды.



7-сурет. №2 режимде өңдеу кезіндегі Ra және Rz беткі қабат кедір-бұдырлығы параметрлерінің мәндері

Ескерту – авторлармен құрастырылды

Осылайша, №2 режим микроқаттылық бойынша нормативтік талаптарға сәйкестікті ғана емес, сонымен қатар сапа көрсеткіштері жоғары беткі қабаттың қалыптасуын қамтамасыз етеді. Бұл кедір-бұдырлық параметрлерінің (Ra және Rz) айтарлықтай төмендеуінен, құрылымдық тұтас және біртекті «ақ қабаттың» түзілуінен, сондай-ақ микрожарықтар мен деламация аймақтары сияқты айқын ақаулардың болмауынан көрінеді. Сонымен қатар, бетке жақын аймақта легирлеуші элементтердің неғұрлым біркелкі таралуы және оттегі мөлшерінің төмендігі анықталды, бұл қабаттың қалыптасуындағы термодинамикалық жағдайлардың тұрақтанғанын көрсетеді. Аталған факторлардың жиынтығы беткі қабат күйі сапасының артқанын айқындайды және хирургиялық құралдың пайдалану сенімділігін арттыруға алғышарттар жасайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы жұмыста хирургиялық сүйек ұстағышты дайындау үшін қолданылатын 10X17H13M2 болатының беткі қабат сапасына сымды электр эрозиялық өңдеудің энергетикалық параметрлерінің әсерін бағалау міндеті шешілді. Кіріспе бөлімде қойылған, WEDM режимдері мен беткі қабаттың пайдалану сипаттамалары арасындағы өзара байланысты орнатуға бағытталған мақсаттар микроқұрылымды, элементтік құрамды, микроқаттылық пен кедір-бұдырлықты кешенді талдау арқылы іске асырылды.

Импульс ұзақтығы мен ток күшінің өзгеруі бетке жақын қабаттың қалыптасуына шешуші әсер ететіні анықталды. №1 режим микрожарықтар мен деламинациясы бар ақаулы құрылымның дамуымен, микроқаттылықтың 180–191 HV-ге дейін төмендеуімен және кедір-бұдырлықтың жоғары мәндерімен (Ra 3,2–3,5мкм; Rz 18–22 мкм) сипатталады. Сонымен қатар, №2 режим легирлеуші элементтері біркелкі таралған, оттегі мөлшері 1,36–1,47 салмақ %-ға дейін төмендеген, 198–204 HV деңгейіндегі тұрақты микроқаттылығы және айтарлықтай төмен кедір-бұдырлығы (Ra 1,2–1,5мкм; Rz 8–10мкм) бар құрылымдық тұтас қабаттың қалыптасуын қамтамасыз етеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы WEDM энергетикалық параметрлері, «ақ қабат» морфологиясы, химиялық тұрақтылық және медициналық мақсаттағы аустенитті болат бетінің пайдалану сипаттамалары арасындағы кешенді өзара байланысты орнату болып табылады. Үзілісті (паузаны) оңтайландыру кезінде разряд энергетикасын арттыру құрылымның нашарлауына емес, керісінше, неғұрлым біркелкі жылу циклі мен эрозия өнімдерінің тиімді шығарылуы есебінен құрылымның тұрақтануына және ақаулықтың төмендеуіне ықпал ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер биомедициналық материалдарды электр эрозиялық өңдеу кезінде беткі қабаттың қалыптасу механизмдері туралы түсініктердің дамуына үлес қосады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы қаттылық бойынша нормативтік талаптарға сәйкестікті, кедір-бұдырлықтың 2 еседен астам төмендеуін және химиялық тұрақты қабаттың қалыптасуын қамтамасыз ететін оңтайлы өңдеу режимін (№2 режим) негіздеуде жатыр. Бұл аталған режимді жоғары механикалық және коррозиялық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін хирургиялық құралдардың функционалдық элементтерін өнеркәсіптік дайындау үшін ұсынуға мүмкіндік береді. Шектеу ретінде зерттеудің дайындаманың бекітілген қалыңдығы (12 мм) және сымды электродтың бір түрі үшін орындалғанын атап өткен жөн, бұл басқа технологиялық жағдайлар үшін қосымша верификацияны талап етеді.

Болашақ зерттеулердің келешегі өңдеу режимдерінің ауқымын кеңейтумен, баламалы электродтық материалдар мен диэлектрлік орталардың әсерін зерттеумен, сондай-ақ өңделген беттердің медициналық құралдарды нақты пайдалану жағдайларына жақын ортадағы шаршауға төзімділігін, тозуға төзімділігін және коррозияға төзімділігін бағалаумен байланысты. Разряд аймағындағы термодинамикалық процестерді модельдеу және WEDM режимдерін басқарудың адаптивті жүйелерін әзірлеу қосымша қызығушылық тудырады.

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетімен BR24992786 «Отандық медициналық құрал-сайман үлгілері мен медициналық мақсаттағы бұйымдарды дайындау технологиясын әзірлеу» бағдарламасын іске асыру шеңберінде қаржыландырылады.

ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКАЛЫҚ КОМИТЕТТІҢ (IRB) МАҚҰЛДАУЫ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Жұмыс тек техникалық сипатта болды және оған адамдар немесе жануарлар қатыстырылмады, сондықтан бұл бөлім «Қолданылмайды» деп белгіленді.

АҚПАРТАНДЫРЫЛҒАН КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Зерттеуге қатысу басталғанға дейін барлық қатысушылардан жазбаша ақпарттандырылған келісім алынды; егер адамдардың қатысуы көзделмесе, бұл бөлім «Қолданылмайды».

МӘЛІМЕТТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ: Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын мәліметтер негізделген сұраныс бойынша тиісті автор тарапынан ұсынылуы мүмкін; немесе, жұмыс сандық модельдеу мен теориялық талдауға негізделгендіктен, жаңа эксперименталды мәліметтер жасалмады.

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

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Осы қолжазбаны дайындау барысында автор(лар) мәтінді қазақ тіліне академиялық аударма жасау және терминологиялық өңдеу үшін жасанды интеллект құралдарын пайдаланды. Барлық аудармалар мен техникалық терминдердің дәлдігі авторлар тарапынан тексерілді және бекітілді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Anil, S. E., Demirtas, H., Kalayci, A., & Cebi, A. (2023). Investigation of the layer effects formed by W-EDM on electrochemical grooving of Stellite 21. *Machines*, 11(8), 823. <https://doi.org/10.3390/machines11080823>
- Bruns, S., Stark, Y., Wieland, M., Stahl, F., Kasper, C., & Scheper, T. (2007). Fast and efficient screening system for new biomaterials in tissue engineering: A model for peripheral nerve regeneration. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 82A(2), 419–429. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31120>
- Chu, C. L., Chung, C. Y., Lin, P. H., & Wang, S. D. (2005). Fabrication and properties of porous NiTi shape memory alloys for heavy load-bearing medical applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(3), 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.002>
- Doudkin, M., Kim, A., Kombayev, K., Azamatov, B., & Azamatova, Z. (2020). Research of cutting temperature reducing of titanium alloy grade 5 below polymorphic transformation depending on calculation of cutting modes. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 10(2), 747–758. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr202074>
- Ho, K. H., & Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13), 1287–1300. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7)
- Huang, T., Zhang, X., Zhang, X., & Ding, H. (2015). Corrigendum to "An efficient linear approximation of acceleration method for milling stability prediction" [*Int. J. Mach. Tools Manuf.* 91 (2015) 77–90]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 91, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.02.006> (Ескерту: Мақала атауы түзетілді).
- Kombayev, K., Khoshnaw, F., Kozhakhmetov, Y., Tleuzhanova, G., Azamatov, B., & Tabiyeva, Y. (2025a). Microplasma sprayed tantalum coatings on Ti Grade 5 extra-low interstitials: Investigation of thickness and porosity control. *Coatings*, 15(4), 464. <https://doi.org/10.3390/coatings15040464>
- Kombayev, K., Nedobitkov, A., Gridunov, I., Kozhakhmetov, Y., Khoshnaw, F., & Aibar, K. (2025b). Surface crack analysis and quality enhancement of 30X13 (AISI 420) martensitic stainless steel gate valve shutters via electrolytic plasma hardening. *Results in Engineering*, 26, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104966>
- Mao, R., Sun, Z., Gan, S., et al. (2025). Optimization of process parameters for wire electrical discharge machining of 9Cr18Mov based on grey relational analysis. *Processes*, 13(5), 1547. <https://doi.org/10.3390/pr13051547>
- Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1(1), 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.07.001>

- Raghunath, V. (2018). Optimization of wire EDM process parameters for SS304 stainless steel using Taguchi method. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(2), 709–714. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201883>
- Świercz, R., & Hołubek, R. (2020). Experimental investigation of influence of electrical discharge energy on the surface layer properties after EDM. *Welding Technology Review*, 92(5), 7–13. <https://doi.org/10.26628/wtr.v92i5.1115> (Ескерту: Автордың тегі түзетілді: Hołubek).
- Wegener, K., Bleicher, F., Krajnik, P., Hoffmeister, H.-W., & Brecher, C. (2017). Recent developments in grinding machines. *CIRP Annals*, 66(2), 779–802. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.006>
- Wu, S., Altenried, S., Zogg, A., Zuber, F., Maniura-Weber, K., & Ren, Q. (2018). Role of the surface nanoscale roughness of stainless steel on bacterial adhesion and microcolony formation. *ACS Omega*, 3(6), 6456–6464. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00769>
- Zhang, X., Liu, Y., Chen, G., Bai, S., Li, Z., Wang, F., & Xu, D. (2025). Long-term continuous corrosion of 316L stainless steel by *Streptococcus mutans* in simulated oral environment. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, 1725414. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1725414>
- ГОСТ 5632–2014. (2014). Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Стандартиформ. https://prg.kz/document/?doc_id=34340759
- // GOST 5632–2014. (2014). Nerzhavayushchie stali i splavy korrozionno-stoykie, zharostoykie i zharoprochnye. Marki [Stainless steels and corrosion-resistant, heat-resistant and high-temperature alloys. Grades]. Standartinform. https://prg.kz/document/?doc_id=34340759 (In Russ.).

Авторлар туралы мәліметтер
Информация об авторах
Information about authors



Мұхаметбек Жақсылық Мұхаметбекұлы – Докторант ББ – 8D07102 «Машина жасау» Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуші-инженер, Өскемен, Қазақстан,
Мұхаметбек Жақсылық Мұхаметбекұлы – докторант ОП – 8D07102 «Машиностроение» инженер-исследователь Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,
Mukhametbek Zhaksylyk – 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>



Азаматов Бағдат Нурланович – PhD, «Алтай Шығыс Қазақстан өңірлік технопаркі» ЖШС бас директоры, Өскемен, Қазақстан
Азаматов Бағдат Нурланович – PhD, Генеральный директор «Восточно Казахстанский региональный технопарк Алтай», Усть-Каменогорск, Казахстан
Azamatov Bagdat Nurlanovich – PhD, CEO of the “East Kazakhstan Regional Technopark Altai,” Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: BAzamatov@edu.ektu.kz,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6381-5846>



Қалиев Данияр Исатайұлы – PhD докторы, «Smart Engineering» ҚО жетекшісі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,

Калиев Данияр Исатайұлы – PhD доктор, руководитель ЦК «Smart Engineering», Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,

Kaliyev Daniyar – PhD, Head of Competence Center «Smart Engineering», D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: dkaliyev@edu.ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-2022>



Комбаев Куат Курганович – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан,

Комбаев Куат Курганович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,

Kombayev Kuat – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,

e-mail: kkombayev@edu.ektu.kz,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6929-2748>



Апбазов Куаныш Ермеқұлы – бакалавр, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті зерттеуш-инженер, Өскемен, Қазақстан,

Апбазов Куаныш Ермеқұлы – бакалавр, инженер-исследователь Восточно-Казakhstanский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан,

Apbazonov Kuanysh – bachelor, research engineer D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan,
e-mail: apbazovk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9160-2932>