

Polatova Zhansaya* – Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhansaya.pb@gmail.com, zh.polatova@atu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5668-2563>.

Madina Sydykova – Senior-Lecturer, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: m.sydykova@atu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5841-376X>.

Поступила в редакцию 05.01.2026
Поступила после доработки 20.02.2026
Принята к публикации 23.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-26](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-26)



FTAXP: 53.49.21

**А.Т. Рахметоллаева^{2*}, Д.А. Әскержанов^{1,2}, Н.Е. Қадырболат^{1,2}, А. Ерболұлы^{1,2},
Р.К. Құрманғалиев²**

¹Шәкәрім университеті, «Қатайту технологиялары және жабындар» Инжиниринг Орталығы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

²Шәкәрім университеті, Техникалық физика және жылуэнергетика кафедрасы,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

ЭЛЕКТРОЛИТТИ-ПЛАЗМАЛЫҚ ҚАТАЙТУ КЕЗІНДЕГІ 65Г БОЛАТ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ӨЗГЕРІСІ

Аңдатпа: Осы жұмыста 65Г маркалы болатқа электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) әдісінің әсері зерттелді. Зерттеу алдында үлгілердің беті механикалық әдіспен тегістеліп, кейіннен жылтырату операцияларынан өткізіліп, бастапқы беткі ақаулар мен бөгде қабаттар толықтай жойылды. Зерттеу барысында натрий карбонатының 20%-дық ерітіндісі электролит ретінде қолданылып, үш үлгіге әртүрлі қыздыру уақыттарымен ЭПҚ жүзеге асырылды. Материалдың бастапқы микроқұрылымы феррит пен перлит құрылымдық бөлшектерінен тұратындығы көрсетілді. Шынықтыру нәтижесінде аустенит мартенситке айналып, өте ұсақ ине тәрізді құрылым қалыптасты. Сканерлеуші электронды микроскоп арқылы алынған бейнелер ЭПҚ өңдеуі беткі қабаттың құрылымын айтарлықтай өзгертетінін көрсетті: түйіршіктер ұсақталып, карбидтік фазалар түзіліп, беткі қабаттағы микроқаттылық едәуір артты. Мартенситтің түзілуі және марганец элементінің болатының қатаю қабілетіне әсері қаттылықты 3,1-3,56 есе арттыруға мүмкіндік беретіндігі дәлелденді. Зерттеу нәтижелері 65Г болатының микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерінің ЭПҚ әдісі арқылы өңделген болат бөлшектердің беріктігі мен сенімділігі артып, олардың қызмет ету мерзімі ұзартылады. Осыған байланысты аталған әдіс машина жасау, көлік және ауыл шаруашылығы техникасында ауыр жүктемелер мен үйкеліс жағдайында жұмыс істейтін серіппелер, біліктер, тісті доңғалақтар және басқа да жауапты бөлшектерді өндіруде перспективалы әрі тиімді технология ретінде қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: болат 65 Г, электролитті-плазмалық қатайту, қаттылық, беткі қабаттың құрылымы, плазма

Кіріспе

Қазіргі заманда машиналар мен құрал-саймандардың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыру үшін металл бөлшектердің беткі қабатын қатайту ерекше маңызды. Болат бөлшектердің қызмет ету мерзімін арттыру және олардың механикалық қасиеттерін жақсарту үшін беткі қабатты қатайту маңызды мәселе болып табылады. Электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) – бұл металл бетінің құрылымын өзгертіп, қаттылығын арттыруға мүмкіндік беретін заманауи әдіс. Әсіресе, ауыр жүктемелерге, абразивті әсерлерге және жоғары температураға ұшырайтын бөлшектерді өңдеуде ЭПҚ тиімді болып саналады [1].

Басқа зерттеулерде анод ретінде диаметрі шамамен 190 мм болатын тот баспайтын болат конустары қолданылып, плазматронмен локализацияланған жылытылу үшін пайдаланылған. Мұндай конфигурацияларда разрядтар бетке таралуы әртүрлі болып, беткі

қабаттың қаттылығы мен құрылымының біркелкілігіне әсер етеді. Қолданылған параметрлер мен конфигурация біздің зерттеулерде мартенситтің қалыптасуын және беткі қаттылықты арттыру тиімділігін көрсетті [2].

ЭПҚ әдісі қысқа уақыт ішінде беткі қабатты қатайтып, бөлшектің механикалық қасиеттерін едәуір жақсартыады. Басқа авторлардың зерттеулерімен салыстырғанда, біздің тәжірибемізде беткі қабаттағы құрылымның ұсақ түйіршікті болуы, микроқаттылықтың жоғары болуы және разрядтардың локализацияланған сипаты айқын көрінді. Бұл әдісті жоғары жүктемелерге ұшырайтын машиналар мен механизмдердің бөлшектерін өндіруде қолдану тиімді.

ЭПҚ 65Г болаты сияқты конструкциялық болаттарды өңдеуде сенімді және нәтижелі әдіс болып табылады. Басқа зерттеулермен салыстырғанда, біздің нәтижелер беткі қабаттағы мартенситтің түзілуі, қаттылықтың ұлғаюы және микроқұрылымның ұсақ түйіршікті болуын растайды. Бұл әдіс бөлшектердің қызмет ету мерзімін ұзарту және сенімділігін арттыру үшін тиімді болып табылады.

Бұл жұмыста 65Г болатында ЭПҚ жүргізілген кезде беткі қабаттағы микроқаттылықтың артуы зерттелді. Катодтық кернеудің жоғарылауы (360 В дейін) шеткі аймақтарда ток тығыздығының максималды мәнге жетуіне алып келіп, жылу градиентінің пайда болуына ықпал етті. Бұл беткі қабаттағы құрылымның біркелкі емес өзгеруін түсіндіреді.

Материалдар мен әдістер

Электролитті-плазмалық технология материалдардың бетін өңдеуде қолданылатын заманауи әрі нәтижелілігі жоғары әдістердің қатарына жатады. Бұл тәсілдің ерекшелігі - плазмалық әсер мен электролиттік процестердің бір технологиялық цикл аясында жүзеге асырылуында. Осындай үйлесімнің арқасында әдіс машина жасау саласында, металл бұйымдарын өңдеуде, электрондық құрылғылар өндірісінде, сондай-ақ медициналық мақсаттағы құрал-жабдықтарды дайындауда кең қолданыс табуда. Аталған технология материалдардың беткі қабатының эксплуатациялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді, соның ішінде олардың тозуға қарсы төзімділігін арттырып, коррозиялық әсерлерден қорғау деңгейін күшейтеді [3].

Электролитті-плазмалық қатайту металдарды беттік термиялық өңдеудің тиімді әдісі болып табылады. Бұл процесс барысында бөлшек электролиттік ортаға батырылып, электрлік разрядтың әсерінен оның беткі аймағы өте жоғары температураға дейін қыздырылады. Қыздырумен қатар жүретін электролиз құбылысы металдың үстіңгі қабатының химиялық құрамына өзгеріс енгізеді. Нәтижесінде болаттың физика-механикалық сипаттамалары айтарлықтай жақсарады: қаттылығы жоғарылады. Сонымен бірге, бұл технологияның құрылымдық қарапайымдылығы мен қоршаған ортаға зиянсыздығы оны өндірістік жағдайда кеңінен қолдануға қолайлы етеді [4, 5]. Сурет 1-де ЭПҚ қондырғысы көрсетілген.



Сурет 1 – Электролитті-плазмалық қондырғысының сыртқы көрінісі

Металлографиялық талдау HL-102AW микроскопында, 3.0 МПа (сурет 2) бөлшектік камерамен және Altamі фирмасының арнайы бағдарламалық қамтамасыздандыруымен жүргізілді. Металлографиялық микроанализ жүргізу үшін үлгілер хром тотығына негізделген пастамен жылтыратылғаннан кейін, улағыш ретінде азот қышқылының 3%-дық спирттік ерітіндісі қолданылды [6, 7].

Микротұтқырлықты өлшеу Виккерс әдісі бойынша HV-1 DT құрылғысымен 1 Н инденаторға түсірілген жүктеме және 10 секунд тұрып қалу уақытымен жүргізілді, бұл ГОСТ 9450-76 стандарттарына сәйкес [8, 9].

65Г болатының ЭПҚ әдісімен өңделгеннен кейінгі микроқұрылым мен фазалық құрамды зерттеу үшін JEOL JSM-6390LV Scanning Electron Microscope құрылғысында сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) қолданылды сканерлеуші электронды микроскопы материалдардың беткі морфологиясы мен микроқұрылымын зерттеуге арналған. Ол төмен вакуум режимінде жұмыс істеп, үлгіні күрделі дайындаусыз жоғары ажыратымдылықтағы бейнелер алуға мүмкіндік береді [10].



Сурет 2 – Металлографиялық микроскоп және Виккерс бойынша қаттылық тексеру құралы

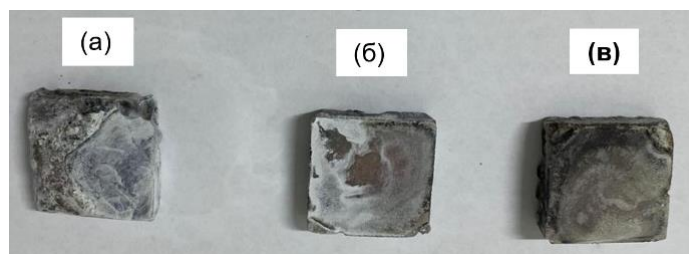
Нәтижелер мен талқылаулар

Эксперименттік жұмыстар мен сынақтар Шәкәрім университетінің «Қатайту технологиялар және жабындар» инжинирингтік орталығында жүзеге асырылды. Зерттеу материалы ретінде 65Г маркалы болат таңдалып, өлшемдері 30×30×7 мм болатын үлгілер дайындалды. Өңдеуге дейін үлгілердің беті механикалық түрде тегістеліп, жылтырату операциясынан өткізілді. Электролитті-плазмалық қатайту үдерісі арнайы қондырғыда үш үлгіге жүргізілді. Қолданылған ЭПҚ режимдерінің негізгі параметрлері 1-кестеде келтірілген. Барлық тәжірибелер барысында электролит ретінде натрий карбонатының 20%-дық судағы ерітіндісі пайдаланылды.

Кесте 1 – ЭПҚ параметрлері

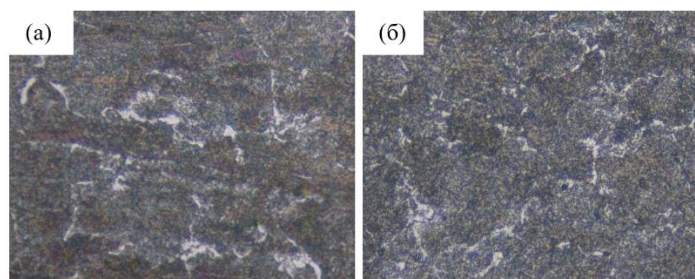
Үлгі	Кернеу, В	Ток күші, А	Қыздыру уақыты, с
Үлгі 1	360	90	15
Үлгі 2	360	90	12
Үлгі 3	360	90	9

1-кестеден көрініп тұрғандай, барлық үлгілер үшін қолданылған кернеу 360-В. Қыздыру үшін әртүрлі уақыттар алынды. Эксперимент нәтижесінде No 1 үлгі қатты балқуға ұшырады, оны сурет-3 көрсетілген. Қатты балқуға әкелген негізгі фактор қыздыру уақытының көп болуы себебінен. Қалған үлгілердің беттік қабаты қатты формасын өзгертпеді.



Сурет 3 – 65Г болаттың ЭПҚ кейінгі үлгілері
а – Үлгі. 1; б – Үлгі. 2; в – Үлгі. 3

Алынған нәтижелерге сәйкес, 65Г маркалы болаттың бастапқы күйіндегі құрылымы феррит пен перлит фазаларынан құралған. Бұл құрылым 4-суретте көрсетілген. Үлгілерді металлографиялық зерттеу барысында феррит бөліктері ашық түспен, ал перлит аймақтары біршама күңгірт реңкте байқалды.



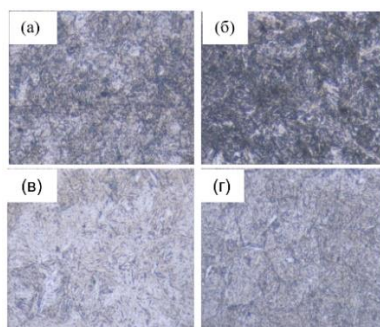
а – Үлгі. 2; б – Үлгі 3

Сурет 4 – 65Г болатының шынықтыруға дейінгі микроструктурасы

Мұндай айырмашылық үлгілерді азот қышқылы қосылған спирттік ерітіндімен өңдегеннен кейін айқынырақ көрінді. Жүргізілген химиялық өңдеу болаттың микроқұрылымындағы фазалар арасындағы шекараларды нақты ажыратуға мүмкіндік берді.

Болатты шынықтыру кезінде оны аустениттік жоғары температуралық күйден тез суытудың нәтижесінде құрылымдық өзгерістер орын алады. Осы процесс барысында аустенит фазасы мартенситке айналады. Мартенсит – метастабильді күйде болатын, өте майда түйіршікті құрылымымен ерекшеленетін фаза. Ол, әдетте, жіңішке әрі созылыңқы кристалдар түрінде түзіліп, материалдың механикалық беріктігін арттыруға әсер етеді [11, 12].

5-суретте мартенситтік құрылымдардың айқын қалыптасқанын көруге болады. Кристалдық торының қаттылығы жоғары болуына байланысты мартенсит болаттың қаттылығын едәуір ұлғайтып, сонымен қатар оның тозуға төзімділік қасиеттерін қамтамасыз етеді. Ұсынылған бейнелер электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) әсерінен материалдың микроқұрылымында орын алған елеулі өзгерістерді айқын көрсетеді. Алынған суреттер болаттың әртүрлі аймақтарындағы беткі қабаттың құрылымдық ерекшеліктерін сипаттап, өңдеу нәтижесінде жүрген фазалық қайта түзілу мен құрылымдық түрленулер жөнінде тұжырым жасауға негіз береді.

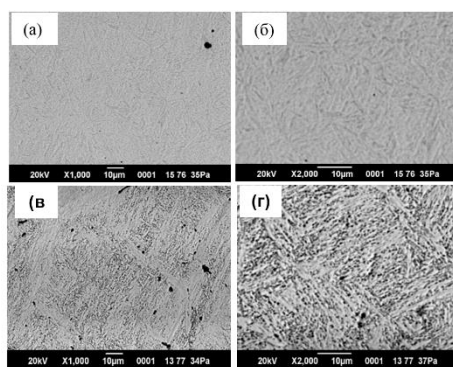


Сурет 5 – 65Г болатының шынықтырылған кейінгі кесіндісінің микроқұрылымы

а,в – Үлгі 2; б,г – Үлгі 3

Электролитті-плазмалық қатайту (ЭПҚ) өңдеуінен кейін 65Г болатынан дайындалған үлгілердің сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) арқылы алынған бейнелерінде температура әсерінен туындаған микроқұрылымдық өзгерістер айқын байқалады. Микросуреттерді талдау барысында 65Г болатының қатайтудан кейінгі микроқұрылымы марганец элементінің әсерімен қалыптасқаны анықталды. 6-суретте беткі қабатта ұсақ және тығыз орналасқан ине тәрізді құрылым айқын көрінеді. Бұл құрылым мартенситтік сипатқа ие болып, қатайтудың тиімді өткенін дәлелдейді. Құрылым элементтерінің бір бағытта орналасуы мен жоғары тығыздығы осы аймақтағы қаттылық деңгейінің жоғары болуына тікелей әсер етеді.

Жалпылай айтқанда, болаттың беткі қабаттарында қаттылықтың артқаны байқалды, ондай әсер марганецтің есебінен болуы мүмкін. Ал материалдың терең қабаттарына өткен сайын құрылым біртіндеп сиреп, морфологиясы өзгереді. Бұл құбылыс қаттылықтың қима бойымен біркелкі таралмауымен және марганецтің микроқұрылым түзілуіне әртүрлі әсер етуімен түсіндіріледі. Осылайша, алынған суреттер 65Г болатында марганецтің қатайту үдерісіне маңызды рөл атқаратынын көрсетеді. Беткі қабатта ұсақ түйіршікті және жоғары қаттылыққа ие құрылым қалыптасса да, терең қабаттарда құрылымдық және қасиеттік айырмашылықтар пайда болатыны байқалады.

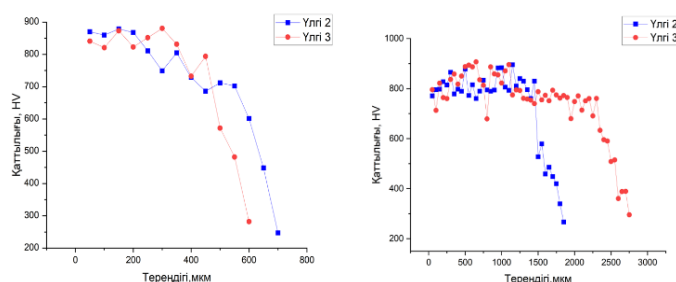


а, в – Үлгі 2; б, г – Үлгі. 3

Сурет 6 – 65Г болатының микроқұрылымының СЭМ-суреттері: 1000, 2000 есе үлкейтілгендегі көрінісі

65Г болатында қатайтудан кейін мартенситтік құрылым пайда болуы қаттылықтың едәуір артуына ықпал етеді. Бұл қасиет болатты қаттылығы жоғары талап етілетін маңызды бөлшектер мен тораптарда қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, мартенситтің болуы созылуға беріктілік пен шаршауға төзімділікті күшейтіп, циклдік немесе айнымалы жүктемелерге ұшырайтын элементтердің сенімділігін арттырады. Дегенмен, мартенсит фазасының тым көп болуы материалдың пластикалық қасиеттерін және соққыға төзімділігін төмендетуі мүмкін. Сондықтан болаттың жобалануы мен пайдаланылуы кезінде оның механикалық сипаттамаларының оңтайлы үйлесімін сақтау үшін осы факторларды ескеру қажет.

65Г болатының беткі қабатының микротұтқырлығы ЭПҚ кейінгі өлшемдері 7-суретте көрсетілген. Алғашқы күйде 65Г болатының микротұтқырлығы 236,4HV деңгейінде болған. Ең үлкен өсу 3-нөмірлі үлгіде тіркеліп, оның мәні 906,9 HV-ге жетті. Салыстырмалы түрде қарағанда, ЭПҚ-дан кейін 65Г болатының микроқаттылығы бастапқы көрсеткіштерге қарағанда 3,1-3,56 есе артатыны анықталады. Сонымен қатар, қатайтылған беткі қабаттың қалыңдығы шамамен 2,2-3 мм болғаны анықталды. Бұл әдістің тиімділігін көрсетеді және 65Г болатын бөлшектерді жоғары механикалық жүктемелер мен қарқынды үйкеліс жағдайында қолдануға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер машина жасау және көлік салаларында ауыр жүктемелерге ұшырайтын жабдық бөлшектерінің қызмет ету мерзімін ұзартуға және олардың сенімділігін арттыруға негіз бола алады.



Сурет 7 – Электролитті-плазмалық қатайтудан кейінгі 65Г үлгілерінің көлденең қимадағы қаттылығының таралуы

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер 65Г болатына натрий карбонатының электролит ретінде қолданылуымен ЭПҚ әдісінің жоғары тиімділігін дәлелдеді. Бұл өңдеу микроқұрылым мен микроқаттылық көрсеткіштерін айтарлықтай жақсартты. Шынықтыру нәтижесінде қатты беткі қабат қалыптасып, оның микроқаттылығы 800-900 HV дейін артты, бұл бастапқы көрсеткіштермен салыстырғанда 3,1-3,56 есе жоғарылауын қамтамасыз етті.

Жүргізілген зерттеулер электролиттік-плазмалық қатайту әдісінің 65Г болатынан дайындалған бөлшектердің жоғары механикалық және абразивті әсерлер жағдайында жұмыс істеу төзімділігін едәуір арттыратынын көрсетті. Қатайтудың бұл тәсілі бұйымдардың қызмет ету мерзімін ұзартуға және пайдалану барысындағы сенімділігін жоғарылатуға мүмкіндік

береді. Осыған орай, аталған әдісті жоғары жүктемелерге және агрессивті ортаға ұшырайтын машиналар мен механизмдердің бөлшектерін өндіруде қолдану орынды болып табылады. Алынған нәтижелер 65Г болатынан жасалған өнімдердің ресурсын арттыруға бағытталған технологияны өнеркәсіптік тәжірибеде әрі қарай дамыту мен жетілдіруге негіз болады.

Әдебиеттер тізімі

1. Belkin P.N. Plasma electrolytic hardening of steels: Review / P.N. Belkin, S.A. Kusmanov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2016. – Vol. 52, № 6. P. 531-546.
2. The Role of Current Density Distribution on Local Hardening of 20GL Steel During Electrolytic Plasma Processing / R. Kurmangaliyev et al // Materials. – 2025. – № 18(22). – P. 5073.
3. Effect of electrolyte-plasma surface hardening on structure wheel steel 2 / B.K. Rakhadilov et al // Bulletin of the Karaganda University «Physics Series». – 2020. – Vol. 98, № 2. – P. 68-74.
4. Influence of plasma electrolytic hardening modes on the structure and properties of 65G steel / B.K. Rakhadilov et al // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Vol. 5, № 3. – Article 6.
5. Effect of Electrolytic-Plasma Hardening on the Microstructure and Tribological Properties of Low-Alloy Steels / B. Rakhadilov et al // Metals. – 2025. – Vol. 15, № 7. – Article 698.
6. The Effect of Electrolytic-Plasma Hardening Time on the Microstructure, Hardness, and Corrosion Behavior of Medium-Carbon Steel / Y. Mukhametov et al // Crystals. – 2025. – № 15(12). – Article 1058.
7. Metallographic Sample Preparation and Examination. Academia.edu. – 2015. – P. 12-36.
8. Electrolytic Plasma Hardening of 20GL Steel: Thermal Modeling and Experimental Characterization of Surface Modification / B. Rakhadilov et al // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, № 15. – Article 8288.
9. GOST 9450-76. Metody opredeleniya mikrotverdosti. Vickers. Moskva: Izdatel'stvo standartov, 1976. – 35 s. (In Russian).
10. Marček L. Microscopic Analysis of Structure and Wear for Metallic Materials Using SEM / L. Marček, J.Jr. Vavro, J. Vavro // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, № 20. – Article 9378.
11. Reed-Hill R.E. Physical Metallurgy Principles. 4th edition / R.E. Reed-Hill, R. Abbaschian // Boston: Cengage Learning. – 1994. – P. 212-235.
12. Bhadeshia H.K.D.H. Steels: Microstructure and Properties. 4th edition / H.K.D.H. Bhadeshia // Oxford: Butterworth-Heinemann. – 2017. – P. 145-160.

А.Т. Рахметоллаева^{2*}, Д.А. Әскержанов^{1,2}, Н.Е. Қадырболат^{1,2}, А. Ерболұлы^{1,2}, Р.К. Құрманғалиев²

¹Университет Шәкәрім, Инжиниринговый центр «Технологии упрочнения и покрытия»

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

²Университет Шәкәрім, кафедра технической физики и теплоэнергетики,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ 65Г ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ

В данной работе исследовано влияние метода электролитно-плазменной закалки (ЭПЗ) на сталь марки 65Г. Перед проведением исследований поверхность образцов была механически выровнена, затем подвергнута операциям шлифования и полирования, в результате чего были полностью удалены исходные поверхностные дефекты и посторонние слои. В ходе эксперимента в качестве электролита использовался 20%-ный раствор карбоната натрия, и для трёх образцов ЭПЗ осуществлялась при различных временах нагрева. Показано, что исходная микроструктура материала состоит из структурных составляющих феррита и перлита. В результате закалки аустенит превращается в мартенсит, формируя сверхмелкую игольчатую структуру.

Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показали, что электролитно-плазменная обработка существенно изменяет структуру поверхностного слоя: происходит измельчение зёрен, формирование карбидных фаз и значительное увеличение микротвёрдости поверхностного слоя. Установлено, что образование мартенсита и влияние легирующего элемента марганца на прокаливаемость стали позволяют повысить твёрдость в 3,1-3,56 раза.

Результаты исследования показывают, что обработка стали 65Г методом ЭПЗ приводит к улучшению её микроструктуры и механических свойств, повышению прочности и надёжности обработанных деталей, а также увеличению срока их службы. В связи с этим данный метод может

быть использован как перспективная и эффективная технология при изготовлении пружин, валов, зубчатых колёс и других ответственных деталей, работающих в условиях высоких нагрузок и трения, в машиностроении, транспортной и сельскохозяйственной технике.

Ключевые слова: сталь 65Г, электролитно-плазменное упрочнение, твердость, структура поверхности, плазма.

A.T. Rakhmetollayeva^{2*}, D.A. Askerzhanov^{1,2}, N.E. Kadyrbolat^{1,2}, A. Yerboluly^{1,2}, R.K. Kurmangaliyev²

¹Shakarim University, Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings»,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A

²Shakarim University, Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka St., 20A

*e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com

STRUCTURAL CHANGES OF 65G STEEL DURING ELECTROLYTIC PLASMA HARDENING

In this work, the effect of the electrolytic plasma hardening (EPH) method on 65G steel was investigated. Prior to the study, the surface of the specimens was mechanically leveled and subsequently subjected to grinding and polishing operations, which ensured the complete removal of initial surface defects and foreign layers. During the experiments, a 20% sodium carbonate solution was used as the electrolyte, and EPH was applied to three specimens at different heating durations. It was shown that the initial microstructure of the material consists of ferrite and pearlite structural constituents.

As a result of hardening, austenite transforms into martensite, forming an extremely fine needle-like structure. Images obtained using a scanning electron microscope demonstrated that electrolytic plasma treatment significantly modifies the structure of the surface layer: grain refinement occurs, carbide phases are formed, and the microhardness of the surface layer increases substantially. It was proven that martensite formation and the influence of the alloying element manganese on the hardenability of the steel make it possible to increase hardness by 3.1-3.56 times.

The research results indicate that electrolytic plasma hardening improves the microstructure and mechanical properties of 65G steel, enhancing the strength and reliability of treated steel components and extending their service life. Therefore, this method can be considered a promising and efficient technology for manufacturing springs, shafts, gears, and other critical parts operating under heavy loads and friction conditions in mechanical engineering, transport, and agricultural machinery.

Key words: 65G steel, electrolyte-plasma hardening, hardness, surface structure, plasma.

Авторлар туралы мәлімет

Ақнұр Тлеубекқызы Рахметоллаева* – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Думан Әскержанов Аңсағанұлы – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының магистранты; Шәкәрім университетінің университетінің «Қатайту технологиялар және жабындар» инженерлік орталығының ғылыми қызметкері, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат – Шәкәрім университетінің «Жылу энергетикасы» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Айқын Ерболұлы – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының студенті, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Ринат Хамитұлы Құрманғалиев – Шәкәрім университетінің «Техникалық физика» мамандығының докторанты, Семей қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2209-6740>.

Сведения об авторах

Ақнұр Рахметоллаева Тлеубекқызы* – студент специальности «Техническая физика» Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Думан Әскержанов Аңсағанұлы – магистрант по специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, научный сотрудник Инжинирингового центра «Упрочняющие технологий и покрытия», Университет Шәкәрім, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Нұрлат Ерболұлы Қадырболат – студент специальности «Теплоэнергетика», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Айқын Ерболұлы – студент специальности «Техническая физика», Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Ринат Хамитұлы Құрманғалиев – докторант специальности «Техническая физика»; Шәкәрім университет, г. Семей, Республика Казахстан; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2209-6740>.

Information about the authors

Aknur Tleubekkyzy Rakhmetollaeva* – student of «Technical physics» Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aknurrahmetollaeva4@gmail.com.

Duman Askerzhanov Ansaganuly – Master's student in «Technical Physics» Shakarim University, Research Fellow at the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», Shakarim University; Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dumanaskerzhanov541@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3706-4087>.

Nurlat Erboluly Kadyrbolat – student of «Heat power engineering» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: ersinnur44@gmail.com.

Aikyn Erboluly – student of «Technical physics» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aikynerboluly3@gmail.com.

Rinat Khamituly Kurmangaliyev – PhD student in «Technical Physics» Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: rinat_real@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2209-6740>.

Редакцияға енуі 04.02.2026

Өңдеуден кейін түсуі 13.02.2026

Жариялауға қабылданды 23.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-27](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-27)

IRSTI: 53.49.05



N. Kadyrbolat¹, R. Kurmangaliyev¹, Kussainov¹, Z. Satbayeva^{1,2}, D. Zhasbolatov³

¹Engineering Center «Hardening technologies and coatings», Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya str., 4a

²TOO «Plasma Science», 070018, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Gogol str. 7G

³Niigata University, 8050, Japan Nishi-ku, Niigata, 950-2181
*e-mail: ersinnur44@gmail.com

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE VAPOR-GAS ENVELOPE THICKNESS AND STUDYING THE INFLUENCE OF CATHODIC HEATING PROCESS ENERGY CHARACTERISTICS ON THE VAPOR-GAS ENVELOPE THICKNESS

Abstract: A method for calculating the thickness of the vapor-gas envelope formed around the cathode during electrolytic-plasma heating has been developed, taking into account the energy characteristics of the process. The proposed approach is based on an analysis of the energy balance in the near-cathode region and considers the effects of current density, voltage, thermophysical properties of the electrolyte, and heat-transfer parameters on the conditions of evaporation and vapor-gas mixture formation. Experimental studies were carried out under cathodic heating of steel 20 samples in a Na_2CO_3 solution at 100-300 V with simultaneous recording of temperature and electrical parameters. Numerical modeling of current and energy distribution in the near-cathode region was performed in COMSOL Multiphysics. Relationships between the vapor-gas envelope thickness and the discharge energy parameters were established, and it was shown that its growth is accompanied by the transition from nucleate to film boiling of the electrolyte and by an increase in the cathode heating intensity. The obtained results can be used for selecting electrolytic-plasma processing regimes and for modeling thermal processes in the near-cathode zone.

Key words: electrolytic-plasma treatment, steel 20, cathode heating, vapor-gas envelope, envelope thickness, current density, numerical modeling.

Introduction: One of the key factors determining the efficiency of electrolyte-plasma and cathodic electrolyte-plasma processes is the formation of a stable vapor-gas envelope around the