

https://doi.org/10.51885/3134-8041_IACS_2026_3_11

XFTAP 53.31.15

ЭЛЕКТР БЕРУ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ МЕТАЛЛ ТІРЕКТЕРІНІҢ ҚЫЗМЕТ ЕТУ МЕРЗІМІН ТӨМЕНДЕТЕТІН ФАКТОРЛАРҒА ШОЛУ

ОБЗОР ФАКТОРОВ, СНИЖАЮЩИХ СРОК СЛУЖБЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

REVIEW OF FACTORS REDUCING THE SERVICE LIFE OF METAL TRANSMISSION LINE TOWERS

Ж.А. Усенкулов ^{1*}, Ж.М. Сайпов ¹, Ш.Ж. Усенкулова ², К.С. Досалиев ¹,
Б.К. Дүйсенбеков ¹

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан

²К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан

*Жауапты автор: Усенкулов Женисбек Амантаевич, e-mail: alem505@mail.ru

Түйінді сөздер:

электр беріліс
желілерінің металл
тіректері, болат
конструкциялардың ұзақ
мерзімділігі,
атмосфералық коррозия,
металдардың қажу
арқылы бұзылуы,
циклдік жүктемелер,
кернеу шоғырлануы,
динамикалық әсерлер,
коррозиялық-қажу
зақымдануы,
конструктивтік және
монтаждық ақаулар,
конструкцияның қалдық
ресурсы

ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақалада электр беру желісі металл тіректерінің ұзақ уақыт бойы пайдалану кезінде қызмет ету мерзімінің қысқаруын анықтайтын негізгі факторлар қарастырылады. Бұл зерттеудің өзектілігі, қолданыстағы тіректердің тозу дәрежесінің жоғары болуы себебінен және энергетикалық инфрақұрылымның сенімділігін арттыру қажеттілігінен туындайды. Бұл зерттеудің мақсаты – атмосфералық коррозияның, қажудың, динамикалық әсерлердің, сондай-ақ жоба-лау, құрастыру және монтаждау кезінде орын алған ақаулардың тіректердің көтергіштік қабілеті мен қызмет ету мерзіміне әсерін кешенді талдау. Зерттеуде материалдардың қарсылығы теориясының аналитикалық әдістері, құрылымның коррозия мен қажу әсерінен бұзылуының модельдері және есептелген тәуелділіктердің салыстырмалы талдауы қолданылады. Осы факторлардың әсерінен элементтердің беріктігі мен қызмет ету мерзімінің төмендеуінің сандық бағалаулары алынды және түйіндер мен ақау аймақтарындағы кернеу концентрацияларының негізгі рөлі көрсетілді. Бұл зерттеудің ғылыми жаңалығы континенттік аймақтардың климаттық жағдайларын ескере отырып, тіректердің деградация механизмдерін жүйелеуде жатыр. Нәтижелердің практикалық маңыздылығы оларды қалған қызмет ету мерзімін бағалау, материалдарды таңдау және электр беру желісі тіректерінің қызмет ету мерзімін ұзарту шараларын әзірлеу үшін пайдалану мүмкіндігінде жатыр.

Ключевые слова:

металлические опоры
линий электропередачи,
долговечность стальных
конструкций,
атмосферная коррозия,

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные факторы, определяющие снижение долговечности металлических стальных опор линий электропередачи в процессе длительной эксплуатации. Актуальность исследования обусловлена высокой степенью износа существующих опор и необходимостью повышения надёжности энергетической



© 2026 Ж.А. Усенкулов, Ж.М. Сайпов, Ш.Ж. Усенкулова, К.С. Досалиев, Б.К. Дүйсенбеков
Бұл жұмыс Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясы
(CC BY 4.0) бойынша таратылады.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

усталостное разрушение металлов, циклические нагрузки, концентрация напряжений, динамические воздействия, коррозионно-усталостное повреждение, конструктивные и монтажные дефекты, остаточный ресурс конструкции

инфраструктуры. Целью работы является комплексный анализ влияния атмосферной коррозии, усталостных процессов, динамических воздействий, а также конструктивных, производственных и монтажных дефектов на несущую способность и ресурс опор. В исследовании применены аналитические методы сопротивления материалов, модели коррозионного и усталостного разрушения, а также сравнительный анализ расчётных зависимостей. Получены количественные оценки снижения прочности и долговечности элементов при воздействии указанных факторов, показана ключевая роль концентраций напряжений в узлах и зонах дефектов. Научная новизна работы заключается в систематизации механизмов деградации опор с учётом климатических условий континентальных регионов. Практическая значимость состоит в возможности использования результатов для оценки остаточного ресурса, выбора материалов и разработки мероприятий по продлению срока службы опор линий электропередачи.

keywords:

metal transmission line towers, durability of steel structures, atmospheric corrosion, metal fatigue failure, cyclic loading, stress concentration, dynamic effects, corrosion-fatigue damage, structural and installation defects, residual structural life

ABSTRACT

Metal transmission line towers are critical components of power grid infrastructure and are subject to long-term exposure to environmental, mechanical, and operational influences that gradually reduce their structural performance. The relevance of this study is обусловлена the aging of a significant portion of existing transmission networks and the growing need to ensure their reliability and safety under prolonged service conditions. The objective of the article is to provide a comprehensive review and systematization of the main factors that reduce the service life of metal transmission line towers and to assess their combined effect on load-bearing capacity and durability. The study is based on analytical methods of strength of materials, fatigue theory, and corrosion modeling, as well as on the synthesis and comparative analysis of data from scientific and normative sources. The key results demonstrate that atmospheric corrosion, cyclic and dynamic loading, stress concentration in joints, and manufacturing and installation defects act jointly and significantly accelerate structural degradation. It is shown that even moderate corrosion rates and relatively low stress amplitudes can, over long periods, lead to substantial stiffness loss, accelerated fatigue damage accumulation, and an increased risk of failure. The scientific novelty of the work lies in the integrated consideration of these factors as an interconnected system rather than as isolated mechanisms, allowing a more realistic assessment of degradation processes. The practical significance of the results is associated with their applicability to residual life assessment, material selection, and the development of inspection, monitoring, and maintenance strategies for metal transmission line towers operating in continental climatic conditions.

КІРІСПЕ

Болат электр беру желілерінің тіректері энергетикалық инфрақұрылымның негізгі элементтері болып табылады, олар ұзақ қашықтыққа сенімді электр энергиясын беруді және тұтастай алғанда энергетикалық жүйелердің тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Қолданыстағы әуе электр беру желілерінің айтарлықтай бөлігінің ескіруі, жүктемелердің артуы және электрмен жабдықтау сенімділігіне қойылатын талаптардың күшеюімен металл тіректердің ұзақ мерзімділігі проблемасы барған сайын маңызды болып отыр.



Ондаған жылдар бойы жұмыс істеубарысында тіректер атмосфералық коррозияның, циклдік және динамикалық жүктемелердің, құрастыру және монтаждау ақауларының әсерлеріне ұшырайды, бұл жүк көтеру қабілетінің төмендеуіне және істен шығу қаупінің артуына әкеледі. Құрлықтық аймақтар мен Қазақстан территориясы өзіндік ерекше климаттық жағдайлармен сипатталады. Бұл құрылымдардың деградация процестерінің біркелкі еместігін көрсетеді және қалған қызмет ету мерзімін болжауды қиындатады.

Қазіргі ғылыми басылымдарда болат конструкцияларының коррозиясы, қажу бұзылысы және динамикалық әсерлер мәселелеріне айтарлықтай зерттеулер жүргізілгені келтірілген. Дегенмен, зерттеулердің көпшілігі жеке зақымдану механизмдерін жекелей зерттейді немесе жалпы құрылыс конструкцияларына бағытталған. Сонымен қатар, электр беру желісі тіректерінің қызмет ету мерзімін анықтайтын факторларды олардың конструкциялық ерекшеліктері мен пайдалану жағдайларын ескере отырып, кешенді талдау жеткілікті, жүйелі жүргізілмеген. Бұл қолданыстағы тәсілдерді синтездеуді және тірек қызмет ету мерзіміне әртүрлі факторлардың әсерін сандық бағалауды жетілдіруді қажет етеді.

Бұл зерттеудің мақсаты – болат электр беру желісі тіректерінің ұзақмерзімділігін төмендететін негізгі факторларды талдау және жүйелеу, сондай-ақ олардың құрылымдық жүк көтергіштігі мен қызмет ету мерзіміне әсерін бағалау. Осы мақсатқа жету үшін зерттеу негізгі деградация механизмдерін анықтау, коррозия, қажу және динамикалық әсерлерін талдау, сондай-ақ жобалау және монтаждықақаулардың рөлін бағалау мәселелері қарастырылады. Зерттеудің нысаны – электрберу желісі болат тіректері, зерттеу пәні - ұзақ мерзімді пайдалану кезінде олардың ұзақмерзімділігін анықтайтын процестер мен факторлар. Зерттеуде материалдар қарсылығы, коррозия мен қажу бұзылысы модельдерінің аналитикалық әдістері, сондай-ақ ғылыми және нормативтік деректер синтезделініп қолданылады, бұл тұтас ғылыми тәсілді әзірлеуге және зерттеу нәтижелерінің жаңалығын негіздеуге мүмкіндік береді.

ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу нысандары ретінде Қазақстанның оңтүстік аймағында падаланудағы торлы және стерженьді болат әуе электр беру желісінің тіректері қарастырылды. Талдау көміртекті және төмен легирленген болаттардан жасалған құрылымдық элементтерде, соның ішінде электр беру желісінің тіректерінде қолданылатын ең көп таралған СтЗпс, СтЗсп және 09Г2С болат маркаларда жүргізілді. Тозуды бағалау үшін жаппай өндірілген тіректер сериясына сәйкес келетін бастапқы қабырға қалыңдығы 3-8 мм диапазонындағы типтік бұрыштық және табақ пішінді қималардың геометриялық параметрлері пайдаланылды. Материалдардың механикалық қасиеттері, олардың төзімділік шегі және қажу беріктігінің параметрлері туралы бастапқы деректер, анықтамалық және нормативтік құжаттамалардан, сондай-ақ ғылыми шолу басылымдарынан алынды.

Зерттеу аналитикалық және есептеу сипатында болды және отандық, халықаралық дереккөздерде ұсынылған эксперименттік деректерге, сондай-ақ материалдар қарсылығының классикалық әдістері мен металдың қажу теориясын қолдануға негізделді. Атмосфералық коррозия ISO 9223 стандартына сәйкес негізделіп, континенттік жұмыс аймақтарына тән орташа жылдық металл шығынының диапазондарын қолдана отырып бағаланды. Коррозияға байланысты элементтердің жүк көтергіштігінің жоғалуы берілген коррозия тереңдігі үшін көлденең қима ауданының және инерция моментінің азаюын есептеу арқылы анықталды.

Қажу нәтижесіндегі ұзақмерзімділікті талдау үшін циклдік кернеулердің амплитудасы мен істен шығу циклдарының саны арасындағы байланысты сипаттау мақсатында S-N қатынастары пайдаланылды. Есептеулер Баскиннің дәрежелік тәуелділік заңдылығымен және қажет кезде төмен циклді қажуды бағалау үшін Мейсон-Кофин деформация әдісін қолдана отырып жүргізілді. Қажу қисығының параметрлері зерттелген болаттардың қажу шектері үшін анықтамалық мәндерді қолдана отырып калибрленді. Қажу зақымының жинақталуы тіректің қызмет ету мерзіміне айнималы жүктеме амплитудаларының әсерін ескеретін сызықтық зақым қосындысы гипотезасын қолданылды.

Құрылымдарда орын алған ақаулардың әсері кернеулердің шоғырлану факторларын қолданып, олардың мәндері ойық теориясына және Халықаралық дәнекерлеу институтының дәнекерленген және болтты қосылыстарға арналған ұсыныстарына сәйкес қабылданды. Біркелкі емес коррозия аймақтарындағы және дәнекерлеу ақауларындағы жергілікті кернеудің жоғарылауы Нойбер моделін қолдану арқылы бағаланды. Тіректердің динамикалық әсерлердегі жағдайын металл кеңістіктік құрылымдарға тән табиғи жиіліктер мен демпферлік коэффициенттерді ескере отырып, сызықтық діріл модельдерін қолдану арқылы талданды.

Зерттеу жұмыс факторларын жүйелеуді, репрезентативті есептеу модельдерін таңдауды, әрбір фактордың компоненттердің беріктігі мен ұзақ мерзімділігіне әсерін аналитикалық бағалауды және нәтижелерді ғылыми деректерімен салыстыруды қамтыды. Қолданылған материалдар мен әдістердің дұрыстығысәйкес есептеулер нәтижелерімен тексерілді және ұсынылған тәсілдерболат электр беру желісі тіректерінің қалған қызмет ету мерзімін бағалауға және беріктігін арттыру шараларын әзірлеуге мүмкіндік береді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Болат электр беру желісінің тіректері – тұрақты, уақытша, циклдік және екпінді жел жүктемелері жағдайында жұмыс істейтін кеңістіктік металл қаңқалы құрылымдар. Тіректердің қызмет ету мерзімі металдың жағдайына, дәнекерленген және болтты қосылыстардың сапасына, кернеудің таралуының біркелкілігіне және ақаулардың болуына тікелей байланысты. Желдің әсерінен, сымның дірілінен және резонанстық құбылыстардан торлы және құбырлы тіректердің элементтерінде қажу жарықтары пайда болады.

Болат электр беру желісі тіректерінің қызмет ету мерзімінің төмендеуін анықтайтын күрделі процестерді анық көрсету үшін оларды оқшауланған құбылыстар ретінде емес, өзара байланысты процестер ретінде қарастырған пайдалы. Жұмыс кезінде тіректерге бір мезгілде табиғи және климаттық факторлар, коррозия мен қажу процестері, динамикалық жүктемелер, сондай-ақ өндіру және орнату барысында пайда болатын кемістіктері әсер етеді. Бұл факторлардың біріккен әсерлері жеке механизмдер бір-бірін күшейтетін және құрылымның жүк көтеру қабілеті мен қызмет ету мерзімінің жеделдетілген төмендеуіне әкелетін күрделі деградациялық үлгіні қалыптастырады. 1-суретте болат электр беру желісі тіректерінің қызмет ету мерзімін қысқартатын негізгі факторлардың байланыстары және тіректің өмірлік циклінің әртүрлі кезеңдерінде пайда болатын зақымдардың дамуына әсері келтірілген.

Атмосфералық коррозия болаттардың деградациясының анықтаушы факторы. Атмосфералық коррозия болат тіректердің бұзылуының негізгі механизмі болып табылады. Ол ылғалдың, жауын-шашынның, өнеркәсіптің техникалық процесстерінен бөлінетінагрессивті газдардан және тұздардың әсерінен пайда болады. Бұл процесс металл бетінің бірқалыпты және біркелкі емес жұқаруымен сипатталады.



1-сурет. Электр желілерінің болат тіректерінің ұзақмерзімділігіне әсер ететін факторлардың диаграммасы

Ескерту – Блок схеманы авторлар әдеби дереккөздерді талдау және болат электр беру желісінің тіректерін тексеру нәтижелері негізінде құрастырды

Зерттеулерге сәйкес (AusNet Services. 2020), болат электр беру желілері тіректерінің істен шығуының 41 %-ы болттар мен элементтердің коррозиясына байланысты болған. Осы 41%-дың ішінде болт коррозиясы 35 %-ды, ал элементтердің коррозиясы 65 %-ды құрайды (2- а, б суреттер). Болттарды қатайту кезінде қорғаныш мырыш жабынының зақымдалуына байланысты болттар коррозияға ұшырайды, ал күн сәулесі әсер етпейтін болат бұрыштамалардың астыңғы жағында ылғал, кір, шаң және тұздың жиналынуынан коррозиялық процесті күшейтеді.

Уақыт өте келе коррозиялық процестер жүк көтеретін элементтердің қалыңдығының төмендеуіне әкеледі (Усенкулов Ж., Городецкий В.К. 1993). Бастапқы қалыңдығы t_0 және қалыңдығының жоғалуы Δt болатын өзек үшін қалдық көлденең қима ауданы келесі қатынаспен сипатталады:

$$A_{(t)} = A_0 - \Delta t \cdot P, \quad (1)$$

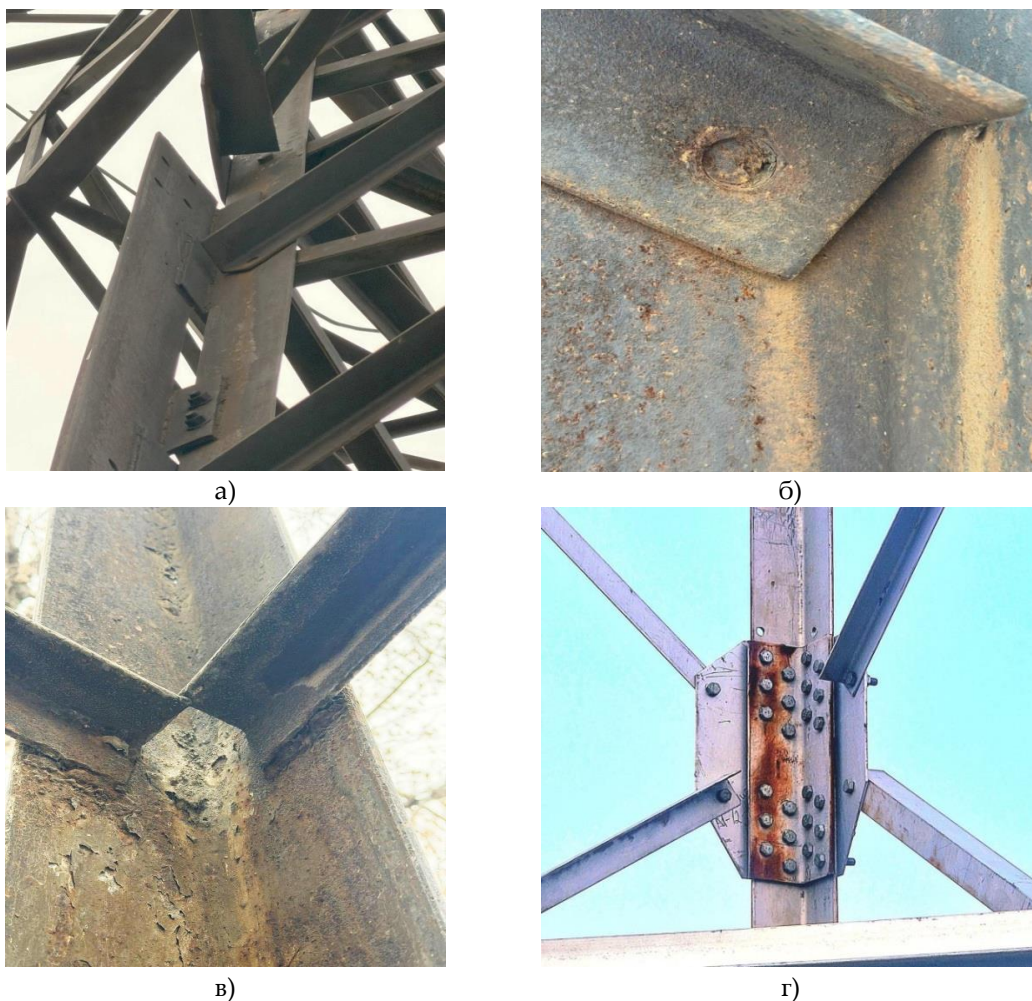
мұндағы P – профильдің периметрі.

Металлдың ішінара жоғалуы инерция моментінің төмендеуіне әкеледі:

$$I_{(t)} = I_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{t_0}\right)^3, \quad (2)$$

бұл қабырға қалыңдығының кубтық сипаттамасы элементтің қатаңдығына әсерін көрсетеді.

Коррозиялық тозуды анықтау және олардың конструкциялардың жұмыс қабілеттілігіне әсерін бағалау мақсатында атмосфералық және өнеркәсіптік агрессивті әсер ету жағдайларында пайдаланылып жатқан, Шымкент қаласында және Түркістан облысы аумағында орналасқан, бірқатар болат электр беру желілері тіректерінің элементтері мен тораптарына нақты зерттеулер жүргізілді. Зерттеу жұмыстары тоттанудың негізгі нысандарын, олардың басым даму аймақтарын айқындауға, сондай-ақ қосылыстардың конструктивтік ерекшеліктері, қорғау жабындарының жай-күйі мен тоттану процестерінің қарқындылығы арасындағы байланысты белгілеуге бағытталды. Тексеріс нәтижесінде анықталған коррозиялық қажу көрінісі 2-суретте көрсетілген.



2-сурет. Электр беру желісі тіректерінің түйіндерінің коррозиялық қажуы:
а – тірек элементтеріндегі біркелкі коррозия; б – болтты қосылыс коррозиясы;
в – дәнекерлеу қосылыстарындағы коррозия; г – болтты қосылыстар аймағындағы
жергілікті коррозия

Ескерту – Көрсетілген коррозиялық зақымданулар электр беру желісі тіректеріне техникалық тексеріс барысында көзбен шолып тексеру және түйіндердің жай-күйін салыстырмалы талдау нәтижесінде анықталған

Көзбен шолып тексеру нәтижесінде болат конструкциялардың коррозиялық зақымдануы көбінесе біртекті сипатқа ие және болтты қосылыстар, дәнекер жіктері аймақтарында және элементтердің ашық беттерінде байқалатындығы анықталды. Анықталған зақымданудың негізгі түрлері – біркелкі атмосфералық коррозия, жергілікті (питтингтік) коррозия, дәнекерленген қосылыстар аймағындағы коррозия және болтты тораптардағы саңылаулы коррозия екендігі байқалды.

Біркелкі тоттану элементтердің тиімді қалыңдығының төмендеуіне және конструкцияның көтергіш қабілетінің азаюына әкеледі. Жергілікті коррозиялық зақымданулар кернеулердің шоғырлануын және шаршау жарықтарының пайда болу ықтималдығын арттырады. Дәнекерленген қосылыстарда коррозиялық бұзылу қалдық кернеулер және металдың құрылымдық біртекті еместігі есебінен күшейеді. Болтты қосылыстарда ойық коррозиясының дамуы саңылауларда ылғалдың және агрессивті қоспалардың жиналуымен байланысты, бұл түйіндердің сенімділігін төмендетеді [Усенкулов Ж.А., Дүйсенбеков Б. 2008].



Алынған нәтижелер коррозиялық процестердің болат конструкциялардың жұмыс қабілеттілігіне кешенді әсер етуін және қалдық ресурсты бағалау және қызмет ету мерзімін ұзарту бойынша іс-шараларды әзірлеу кезінде оларды есепке алу қажеттілігін көрсетеді.

Қазақстанның айтарлықтай бөлігінің климаты күрт континенталды және орташа континенталды болып сипатталады, орташа жылдық ылғалдылығы төмен, жауын-шашын мөлшері шектеулі және көптеген аймақтар теңіз суларынан алыс орналасқан. Осыған ұқсас климаттық жағдайлар Шығыс Еуропаның, Орталық Азияның, Қытайдың солтүстік-батысы мен солтүстігінің, сондай-ақ Солтүстік Американың ішкі бөліктерінің континенталды аймақтарына тән, бұл мәліметтер болат конструкцияларының атмосфералық коррозиясы туралы осы климаттық аймақтағы салыстырмалы деректерін қолдануға мүмкіндік береді.

ISO 9223 жіктемесіне сәйкес, мұндай аймақтар негізінен агрессивтілік дәрежесі бойынша C2–C3 санаттарына жатады және осы санаттар бойынша көміртекті болаттың жылдық коррозиясының жылдамдығы 0,01–0,03 мм құрайды.

Континенттік Еуропада (ішкі Германияны, Шығыс Еуропаны және Скандинавияны қоса алғанда) жүргізілген далалық зерттеулер ауаның тұздылығы төмен және атмосфераның орташа ластануымен болат коррозиясының орташа жылдық жылдамдығы жылына 15-25 мкм болатынын көрсетеді [Morcillo M., Chico B. Díaz, I. Cano, H. 2013]. Қытай мен Жапонияның теңіз жағалауынан алыс орналасқан және құрғақ немесе орташа ылғалды климатпен сипатталатын ішкі аудандары үшін жоғарыдағы ұқсас мәндер алынды, мұнда құрылымдық болаттардың жылдық коррозия шығыны жылына 20-30 мкм-ден аспайтындығын көріп отырмыз [Liang C.F. 2001].

АҚШ пен Канаданың континенттік ауылдық немесе жартылай қалалық аймақтарында жүргізілген зерттеулер болаттың атмосфералық коррозиясының жылына 0,012–0,025 мм шамасындағы жылдамдығын көрсетеді [Chico B. 2017].

Осылайша, орташа жылдық коррозия жылдамдығы 0,015–0,03 мм диапазоны, Қазақстанның көптеген климаттық аймақтарында, соның ішінде далалық, жартылай шөлейтті және континенттік аймақтарда, өнеркәсіптік агрессивтік әсерлер болмаған кезде пайдаланылатын болат конструкцияларының беріктігін бағалау үшін қолдануға жарамды.

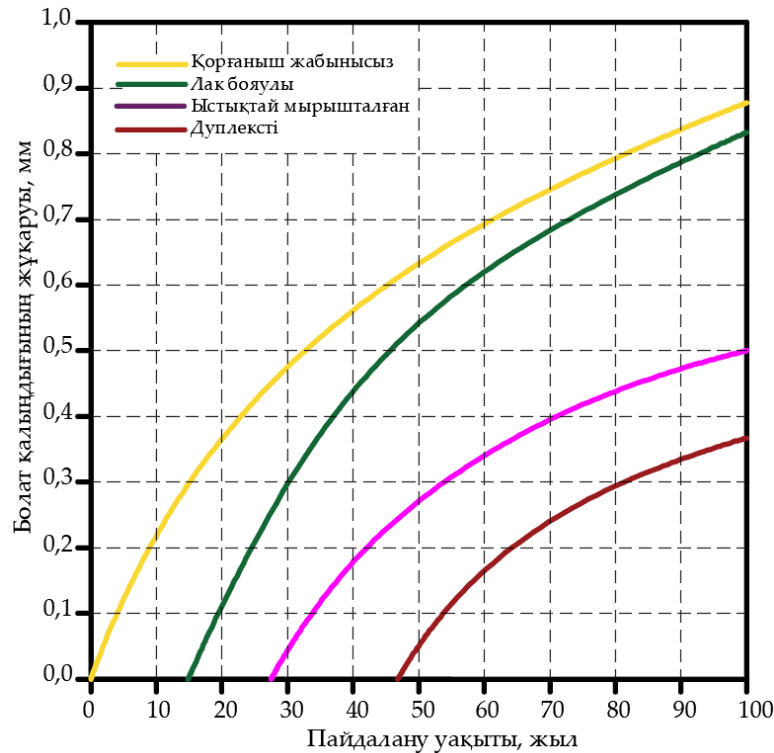
Қазақстанда пайдаланудағы электр беру желісінің тіректерінің көпшілігінің қызмет ету мерзімі 30-45 жылды құрайды. 30 жыл ішінде металл қалыңдығы 0,8 мм-ге дейін азаяды, бұл қолданыстағы профильдердің қалыңдығының айтарлықтай бөлігін құрайды.

3-суретте электр беру желісінің болат тірегінің қалыңдығының жоғалуының әртүрлі коррозияға қарсы қорғаныс жүйелерінің жұмыс уақытына тәуелділігі көрсетілген.

Қорғалмаған болат тіректер үшін атмосфералық ортаның әсер етуі және біркелкі коррозияның дамуы салдарынан коррозия шығындарының үздіксіз сызықтық емес өсуі байқалады, оның жылдамдығы металл бетіндегі коррозия тотығы қабатының әсерінен уақыт өте өзгереді [Усенкулов Ж.А. 1988].

Ыстықтай мырыштау болатты іс жүзінде айқын қорғаныс кезеңін қамтамасыз етеді, себебі алғаш мырыш қабатының тозуынан коррозия процестері кейін жүреді. Мырыш таусылғаннан кейін, негізгі металдың коррозиясы қорғалмаған болаттың коррозия кинетикасына ұқсас жүреді, бірақ айтарлықтай кідіріспен, бұл тіректің қызмет ету мерзімінің ұзарғанын көрсетеді.

Электр беру желілерінің болат тіректері қызмет етуінің алғашқы кезеңінде лакты бояу қорғаныш жүйелері әдетте болаттың қалыңдығын жоғалтпайды. Дегенмен, қорғаныш жабынның ескіруі және тозуы нәтижесінде ылғал мен агрессивті компоненттердің жабынның астына енуіне байланысты қабықша астындағы коррозия артады және алдымен қосылыстар мен жергілікті ақаулардың беткі аймақтарында дамуына әкеледі. Бұл қорғалмаған металлмен салыстырғанда коррозиялық шығындардың уақытша жоғарылауына әкеледі.



3-сурет. Әртүрлі коррозияға қарсы қорғаныс жүйелеріндегі жұмыс уақытына болат электр беру желісі тіректерінің қалыңдық жоғалу тәуелділігі

Ескерту – Қисықтар бояу және лак жабындарын пайдалану кезінде және коррозияға қарсы жүйелерді біріктіру кезінде, қорғаныс болмаған кезде металдың коррозиялық тозуының кинетикасын көрсетеді; деректер эксперименттік және әдеби дереккөздер негізінде қорытындыланған

Болат қалыңдығының ең аз қажылуы ыстықтай мырыштау мен бояу жабынын біріктіріп дуплексті қорғаныс жүйесін пайдаланған кезде байқалады. Бұл қорғаныс қабаттарының біріккен әсері мырыш қабатының жоғалуын баяулатады және металды сыртқы ортадан қосымша оқшаулауды қамтамасыз етеді, бұл қорғаныс кезеңінің максималды ұлғаюына және болжамды қызмет ету мерзімі ішінде коррозиядан болатын шығындарды азайтады.

Ойықты коррозия кернеу концентраторларына айналады, оларды Нойбер моделіне сәйкес жергілікті түрде арттырады [Neuber, H. 1961]:

$$\sigma_{loc} = K_t \sigma_{nom} \quad (3)$$

мұндағы кернеу концентрациясының коэффициенті K_t питтинг үшін 3–6-ға жетеді.

Қажу процестері және циклдік жүктемелер. Электр беру желісінің болат тіректері – айнымалы жүктемелер әсерлеріне ұзақ уақыт жұмыс істейтін кеңістіктік торлы құрылымдар. Циклдік жүктеменің негізгі көздері – жел, температураның ауытқуы, мұз жүктемелері және найзағайдан қорғайтын сымдардың тербелісі. Осылардың нәтижесінде, тірек элементтері әдетте материалдың беріктігінен аспайтын кернеу деңгейлерінде миллиондаған жүктеме циклдарын бастан өткереді.

Қажу ұзақмерзімділігін бағалаудың классикалық құралы - циклдік кернеулердің амплитудасы мен істен шығу алдындағы циклдар саны арасындағы байланысты орнататын S-N қисығы (stress-life curve). Бұл қисықтың пішінін талдау кернеу деңгейінің аздап төмендеуі құрылымның қызмет ету мерзімінің еселеп артуына әкелуі мүмкін екенін көрсетеді [Suresh, S. 1998].



Циклдік кернеулердің әсерінен дамитын қажу бөлінуі Мейсон-Кофин заңдылығымен [Manson, S.S. 1953], немесе Баскин дәрежелік тәуелділігімен [Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., Fuchs, H.O. 2000] сипатталады:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N)^b \quad (4)$$

мұндағы σ'_f – қажуға беріктік коэффициенті (материал тұрақтысы), b – Баскин көрсеткіші, ал $2N$ – істен шығу алдындағы жартылай циклдар (кері айналулар) саны.

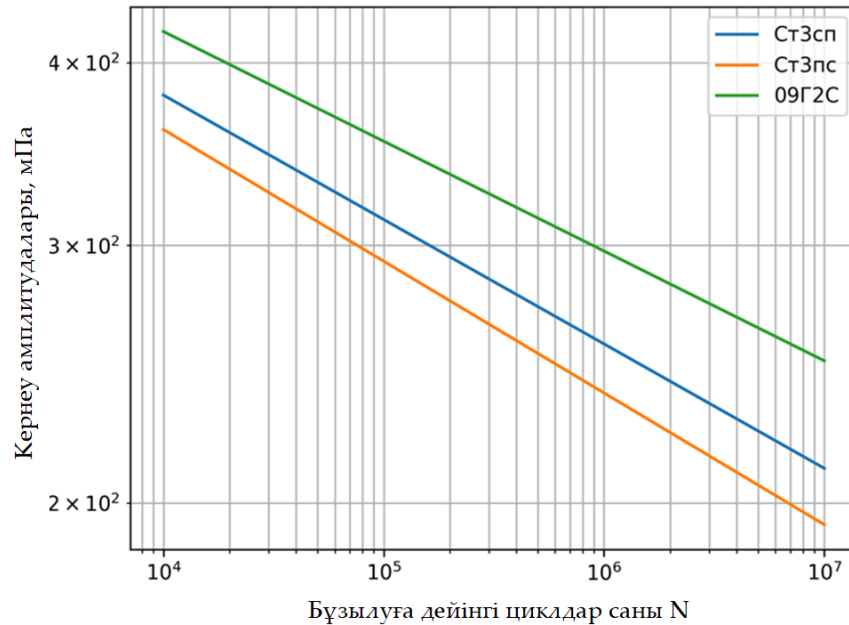
Металл қажуы бойынша ASM шолу деректеріне сәйкес [ASM International. Fatigue of Metals.], b көрсеткіші инженерлік құрылымдарда қолданылатын металдар үшін, типтік орташа мән ретінде -0,09 деп қабылданады. σ'_f мәндері тиісті болат маркалары үшін қажу шегі $\sigma-1$ анықтамалық мәндерін пайдаланып жүргізілді. Анықтамалық $\sigma-1$ ретінде келесі мәндер пайдаланылды: ВСтЗсп үшін (СтЗсп тобының өкілі ретінде) $N = 1 \times 10^7$ кезінде $\sigma-1 = 191$ МПа (тегіс үлгі) [Auremo. *Сталь ВСтЗсп: предел выносливости*]; СтЗпс үшін $\sigma-1 = 175$ МПа (40 мм табак, ыстықтай прокатталған күйде; қажу шегі мәні жеткізушінің бағалау кітапшасында берілген) [ООО «Сталь Максимум». *Сталь СтЗпс: справочные данные. Раздел «Предел выносливости»*]; 09Г2С үшін $\sigma-1 = 235$ МПа (09Г2С болатының қажу шегі анықтамалығында берілген) [NTTZM (справочник марок стали)]. Осы негізде S-N қисығын құру үшін $\sigma_a(N)$ нүктелерінің жиынтықтары есептелді.

1-кесте. S-N қисықтарын құруға арналған бастапқы есептеу деректері
($R = -1$, Baskin HCF моделі)

N, циклдар	σ_a , МПа (СтЗсп)	σ_a , МПа (СтЗпс)	σ_a , МПа (09Г2С)
10 000	355.7	325.9	437.6
30 000	322.2	295.2	396.4
100 000	289.1	264.9	355.7
300 000	261.9	239.9	322.2
1 000 000	235.0	215.3	289.1
3 000 000	212.9	195.0	261.9
10 000 000	191.0	175.0	235.0

Ескерту – Деректер симметриялы жүктеме циклі ($R = -1$) үшін Баскин дәрежелік заңына негізделіп алынды және жоғары циклді қажу (HCF) аймағына сәйкес келеді

Салыстырмалы жүктеме жағдайлары үшін (симметриялық цикл), 09Г2С болатының қызмет ету мерзімінің кең ауқымында қажу беріктігінің жоғары деңгейі байқалады, бұл СтЗ тобының көміртекті болаттарымен салыстырғанда оның жоғары анықтамалық қажу шегіне сәйкес келеді [ISO 5817:2023]. Іс жүзінде бұл циклдар саны бойынша бірдей қажетті ресурспен, 09Г2С-тен жасалған, тірек элементтері үшін рұқсат етілген кернеу амплитудалары жоғары болуы себебінен бірдей кернеулермен күтілетін қызмет ету мерзімі ұзағырақ болуы мүмкін екендігін көреміз. Дегенмен, нақты электр беру желісінің тіректері үшін анықтаушы фактор көбінесе тегіс материалдың қажуы емес, түйін бөлшектерінің сипаттамасы (тесіктер, болтпен бекітілген қосылыстар, дәнекерлеу), дайындық сапасы және коррозиядан қорғау деңгейі, сондықтан, жобалау кезінде бөлшектер/санаттар үшін стандартталған жобалау қисықтары (мысалы, EN 1993-1-9/IIIW сәйкес) пайдаланылуы керек, сонымен қатар мұнда келтірілген СтЗсп, СтЗпс және 09Г2С құрылымдық болаттарының қажу бұзылысының S-N қисықтары негіздеу және салыстыру үшін негізгі материал деңгейі ретінде пайдалануға жарамды. Есептеліп алынған S-N қисықтары 4-суретте көрсетілген.



4-сурет. СтЗсп, СтЗпс және 09Г2С құрылымдық болаттарының қажу бұзылысының S-N қисықтары

Ескерту – Авторлар сызбаны құрылымдық болаттарға арналған эксперименттік және анықтамалық деректерді, Баскиннің дәрежелік тәуелділік моделін пайдаланып есептеулер негізінде құрды

СтЗпс, СтЗсп және 09Г2С болаттарының қажу қасиеттерін салыстырмалы талдау циклдік жүктеме кезінде олардың ұзақ мезімділігі айтарлықтай айырмашылықтарды көрсетеді. Электр беру желілерінің алдыңғы буын тіректерінде кеңінен қолданылған СтЗпс және СтЗсп болаттарының қажу беріктік қасиеттері салыстырмалы түрде төмен және кернеу шоғырлануына сезімтал болғандықтан, қажу беріктігі шектеулі. Жүктеме циклдарының саны артқанда бұл болаттарда рұқсат етілген кернеу амплитудасы жылдам төмендейді, бұл құрылымдық біркелкі емес аймақтарда қажу жарықтарының пайда болу қаупін арттырады.

Ал 09Г2С болат маркасы легирленген қорытпа құрамына, құрылымына және механикалық қасиеттерінің жақсаруына байланысты қажу төзімділігінің жоғарылауымен сипатталады. S-N қисықтарын талдағанда көрсеткендей, бірдей жүктеме циклдарымен 09Г2С болат маркасы үшін рұқсат етілген кернеу амплитудасы СтЗ болатына қарағанда 20-30%-ға жоғары екенін көрсетті. Бұл электр беру желісінің тірек элементтерінің, әсіресе белсенді және қарқынды діріл әсер аймақтарда, ұзақ қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді.

Электр беру желісінің тіректері үшін циклдік кернеу амплитудасының аздап төмендеуінің өзі ерекше маңызды, себебі оның қажу мерзімін күрт арттырады. S-N қатынастарының сипатына сәйкес, кернеу амплитудасының 10 %-ға төмендеуі қирауға дейінгі циклдар санын бірнеше есеге арттырады. Бұл жағдай кернеу шоғырлануын төмендетуге бағытталған жобалау шешімдерінің, сондай-ақ қажу беріктігі жоғары болаттарды пайдаланудың орындылығын растайды.

Осылайша, қажу процестері мен циклдік жүктемелер электр беру желісі тіректерінің ұзақмерзімділігін анықтайтын факторлар болып табылады. СтЗпс, СтЗсп және 09Г2С болаттарының қажу жағдайын салыстырмалы талдау нәтижесінде 09Г2С болатын пайдаланатын құрылымдардың қызмет ету мерзімін айтарлықтай арттыратынын және қажу қирауының ықтималдығын азайтатынын көрсетеді. Алынған байланыстар мен



қорытындыларды электр беру желісі тіректерінің қалдық қызмет ету мерзімін есептеуде, жаңа электр беру желілеріне арналған материалдарды таңдауда және қолданыстағы құрылымдардың қызмет ету мерзімін нығайту және ұзарту шараларын әзірлеуде пайдалануға болады.

Биік тіректер үшін айнымалы кернеулердің амплитудасы 40–60 МПа-ға жетеді.

Құрылымдық ақаулар және түйіндердің әсері. Металл торлы электр беру желісінің тіректері – тік, диагональ және көлденең шыбық элементтері қиылысатын көптеген түйіндік қосылыстарымен сипатталады. Түйіндер құрылымның ең кернеулі аймақтары болып табылады, себебі олар геометриялық өзгеруінен, көршілес элементтердің эксцентриситетінен, осьтердің тура болмағанынан және дәнекерленген немесе болтпен бекітілген қосылыстардың болуынан жергілікті кернеу концентрациялары пайда болады.

Түйіндердегі кернеу концентрациясы K_t коэффициентімен өрнектеледі:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

мұнда σ_{max} – түйін аймағындағы жергілікті ең үлкен кернеу;

σ_{nom} – материалдар беріктігі теориясына сәйкес есептелген кездегі элементтегі ең кіші кернеу.

Кернеу шоғырлану коэффициенті түйіннің геометриясына байланысты $K_t = 2.0 / 4.5$, жететіні тәжірибе жүзінде анықталған. Бұл номиналды кернеулерге қарағанда жергілікті кернеулердің екі-төрт есеге артуын білдіреді. Нақты құрылымдарда, дәнекерлеу ақаулары немесе коррозиямен зақымдануы болған кезде, K_t -5.0 асып кетуі мүмкін.

Біздің бақылауларымыз бойынша, келесі аймақтар өте қауіпті:

- *Элемент қалыңдығының өзгеру аймақтары.* Өртүрлі қалыңдықтағы элементтер арасындағы ауысулар қатаңдық градиентін тудырады. Бұл көлбеу кернеулерінің жоғарылауына әкеледі.

- *Дәнекерленген тігістер.* Толық дәнекерленбеген, қиылған және саңылаулар құрылымның қажу беріктігін айтарлықтай төмендетеді. Зерттеулер нәтижесі көсеткендей 0,2-0,3 мм тереңдіктегі кішкентай ақаудың өзі шыдамдылық шегін 25-40%-ға төмендететінін көрсетті.

- *Жапсарлы болтты қосылыстар.* Егер тесіктер дұрыс орналаспаса немесе болттар жеткілікті түрде тартылмаса, микроқозғалыстардың амплитудасы артады, бұл питтингті және саңылау коррозиясының дамуына жағдай жасайды.

- *Эксцентриситеті бар түйіндер.* Өтпелі эксцентриситеттердің болуы қарапайым есептік сызбаларында ескерілмейді, ол жергілікті иілу моменттерінің және қажу жарықтарының пайда болу ықтималдығын арттырады.

Жалпы алғанда, конструкция ақаулары пайдалану факторларының әсерін күшейтеді, зақымдану жылдамдығын арттырады және металл тіректердің қызмет ету мерзімін қысқартады.

Қалыңдығы өзгерген, дәнекер тігістері және түйіспелі қосылыстары бар жерлер де қауіпті аймақтар болып табылады.

Өндірістік және монтаждық ақаулары. Өндірістік және монтаждық кезеңіндегі ақаулар болат әуе электр желісі (ӘЭЖ) тіректерінің қызмет ету мерзімін қысқартушы негізгі факторларының бірі болып табылады. Тірек элементтерін зауытта жасау кезінде, сондай-ақ орнату және монтаждау кезінде пайда болатын ақаулар, құрылымдық элементтердің кернеу-деформация күйін айтарлықтай өзгертеді, бұл зақымдануының жылдам артуына және ұзақ мерзімді пайдалану барысында істен шығудың ықтималдылығының жоғарылауына әкеліп соқтырады.

Өндірістік және монтаждау кезіндегі ең қауіпті ақауларға металдың жеткіліксіз пісірілуі және толық емес балқуы, дәнекерлеу жиектерінің астыңғы аймағы, кеуектілік, қож

қоспалары және жылу әсер ететін аймақтағы микрожарықтар жатады. Бұл ақаулар тиімді көлденең қиманың азаюына және циклдік жүктеме кезінде қажу жарықтарынан сол аймақта кернеу шоғырлануының пайда болуына әкеледі.

Жеткіліксіз пісірілу және толық балқымау ең маңызды ақаулар болып табылады, себебі олардың механикалық әсері жарықтардың бастапқы өлшемдеріне тең. Эксперименттік және есептік зерттеулер [Maddox S.J. 1991] мұндай ақаулардың болуы дәнекерленген қосылыстардың қажу мерзімін қысқартатынын және ақаусыз қосылыстар үшін есептелгеннен айтарлықтай төмен кернеу деңгейлерінде мерзімінен бұрын істен шығуға әкелуі мүмкін екенін көрсетеді.

Халықаралық дәнекерлеу институтының (IIW) ұсыныстарына сәйкес, дәнекер қосылысының геометриясы және дәнекерлеу аймағында ақаулардың болуы қажу қирауының басты факторлары болып табылады, ал негізгі металдың механикалық қасиеттері екінші реттік рөл атқарады [Hobbacher A.F. 2008]. Дәнекерлеу тігістерінің кесінділері тігістің негізгі металға ауысу аймағындағы кернеулер шоғырлануының коэффициентінің күрт ұлғаюы құрылымның ұзақмерзімділігіне айқын әсер етеді. Жапсарлы және бұрыштық дәнекерлеу қосылыстарының қажу беріктігін зерттегенде аз тереңдіктегі қиылуға және қирауға дейін циклдар санының едәуір қысқаруына әкелетінін көрсетті. Қазіргі заманауи жұмыстарда қима дәнекерленген жіктің негізгі металлмен түйісетін аймағында қажу жарығының жедел пайда болуын анықтайтын кіші радиусты геометриялық қима ретінде қарастырылады [Steinbreger C., et al. 2017].

Дәнекерленген металдың кеуектілігі, әсіресе айнымалы жүктемелер әсері кезінде, құрылымдардың ұзақмерзімділігіне кері әсер етеді. Эксперименттік деректер кеуектердің көлемі мен сипаттамалық өлшемдерінің ұлғаюы жергілікті кернеулердің жоғарылауына және металдың құрылымдық біртектілігінің бұзылуына байланысты дәнекерленген қосылыстардың қажу беріктігінің төмендеуіне әкелетінін көрсетеді. Ең қауіптісі - максималды созылу кернеуі аймақтарында орналасқан беткі кеуектілік.

Электр беру желісінің тіректері үшін дәнекерлеу, құрастыру, тасымалдау және монтаждау кезінде пайда болатын қорғаныш мырыш жабынының зақымдануы ерекше назар аудартады. Мырыш қабатының зақымдануы жергілікті атмосфералық коррозияның дамуына, ойықтардың және питтингтердің пайда болуына ықпал етеді, бұл кернеу шоғырлануын одан әрі арттырады. Нәтижесінде, элементтер коррозиялық қажу бұзылысы жағдайында жұмыс істейді, бұл қажу жарықтарының өсу қарқынының жоғарылауымен сипатталады [Behnam F. 2019].

Өндірістік және монтаждық ақауларының бірлескен әсерлері электр беру желісі тіректерінің нақты жүк көтеру қабілетін және қажу мерзімін жобалық мәндермен салыстырғанда 30-40% немесе одан да көп төмендетеді. Бұл дәнекерленген қосылыстардың эксперименттік зерттеулерімен де, ұзақ мерзімді циклдік жүктемелер астында жұмыс істейтін металл конструкцияларының жұмыс ақауларын талдаумен де расталады [Hobbacher A.F. 2009].

Сондықтан, электр беру желілерінің тіректерінің ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету үшін құрылымның өмірлік циклінің барлық кезеңдерінде дәнекерленген қосылыстардың сапасына қатаң бақылау қажет. ISO 5817 және ISO 17635 халықаралық стандарттары ақаулардың қолайлы деңгейлерін белгілейді және бұзбай сынау әдістерін таңдауды реттейді, осылайша қауіпті кемшіліктері бар құрылымдарды пайдалану ықтималдығын азайтады [ISO 5817:2023. *Fusion-welded joints — Quality levels for imperfections*]. Тәуекелге бағдарланған тексеру бағдарламаларын пайдалану және қалған қызмет ету мерзімін бағалау кезінде ақауларды ескеру әуе желілерінің сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыру үшін өте маңызды.



ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижесінде болат электр беру желісі тіректерінің ұзақ мерзімді пайдалану кезінде қызмет ету мерзімінің төмендеуін анықтайтын факторларға кешенді талдау жасалды. Кіріспеде қойылған мақсатқа табиғи, климаттық, коррозия, қажу, динамикалық және құрылымдық-технологиялық факторларды жүйелеу, сондай-ақ олардың тіректердің жүккөтерімділігі мен қызмет ету мерзіміне әсерін бағалау арқылы қол жеткізілді. Зерттеу негізгі деградация механизмдерін анықтау, олардың өзара байланысын талдау және компоненттердің беріктік және деформациялық сипаттамаларының төмендеуінің сандық сипатын негіздеу міндеттерін шешті.

Зерттеудің негізгі нәтижелері атмосфералық коррозия мен циклдік жүктемелердің біріккен әсерлері түйіндік қосылыстар мен ақау аймақтарындағы кернеу концентрацияларымен күшейтіліп, электр беру желісі тіректерінің қызмет ету мерзімін қысқартуда шешуші рөл атқаратынын көрсетеді. Ұзақ уақыт бойы әсер еткен кезде коррозияның орташа жылдамдығы мен айнымалы кернеулердің салыстырмалы түрде төмен деңгейі де қатаңдықтың айтарлықтай төмендеуіне, қажу зақымдануының жылдам жиналуына және істен шығу ықтималдығының артуына әкелетіні анықталды. Зерттеудің ғылыми жаңалығы электр беру желісі тіректерінің деградация факторларын өзара байланысты жүйе ретінде кешенді зерттеуде, сондай-ақ металл шығынын, кернеулердің шоғырлануы және қажу мерзімін бірыңғай есептеу тәсілі аясында байланыстыруға мүмкіндік беретін аналитикалық қатынастарды жалпылаудан тұрады.

Зерттеу нәтижелері қолданыстағы тіректердің қалдық қызмет ету мерзімін бағалауда, жаңа электр беру желілерінің жобалары үшін материалдар мен жобалау шешімдерін таңдауда, сондай-ақ техникалық тексеру және бақылау бағдарламаларын әзірлеуде практикалық тұрғыда өте маңызды. Зерттеу нәтижелерін Қазақстанның оңтүстік батыс агрессивті әсерлері жоқ аймақтарда да қолдануға болады. Зерттеудің шектеулері жұмыстың аналитикалық және есептеу сипаты және жалпыланған анықтамалық деректерді пайдалану болып табылады, бұл нақты тірек түрлері мен жұмыс жағдайлары үшін параметрлерді нақтылауды талап етеді.

Әрі қарай зерттеудің перспективаларына ұсынылған байланыстарды эксперименттік тексеру, нақты жүктеме спектрлерін ескере отырып, коррозия-қажу модельдерін әзірлеу және металл беру желісі тіректерінің қалған қызмет ету мерзімін болжауға сандық мониторинг әдістері мен ықтималдық тәсілдерін біріктіру кіреді.

МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ: Авторлар зерттеу нәтижелеріне, оларды түсіндіруге және осы мақалада ұсынуға әсер етуі мүмкін мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ: Бұл зерттеу ешқандай мақсатты гранттың немесе басқа сыртқы қаржыландырудың қолдауынсыз жүргізілді. Ол авторлардың жоспарланған зерттеу жұмыстарының бөлігі ретінде дайындалды.

АЛҒЫС БІЛДІРУ: Авторлар зерттеу тұжырымдамасын әзірлеуге үлес қосқан кеңестер мен талқылаулар үшін электр беру желілерін жобалау және пайдалану саласындағы әріптестері мен мамандарына, сондай-ақ мақаланың ғылыми деңгейі мен сапасын жақсартуға мүмкіндік берген құнды пікірлер мен ұсыныстар үшін жасырын рецензенттерге алғыс білдіреді.

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА: Мәтін авторлар тарапынан өз бетінше дайындалды. ЖИ құралдары тек орфографиялық және стилистикалық тексеру мақсатында пайдаланылды..

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- ASM International. (n.d.). *Fatigue of metals*. ASM Digital Library. <https://dl.asminternational.org>
- AusNet Services. (2020). *Asset management strategy — Transmission line structures* (AMS 10-77). <https://www.ausnetservices.com.au>
- Behnam, F. (2019). *Influence of hot-dip galvanizing on fatigue behaviour of welded steel joints*. Aalto University. <https://aaltodoc.aalto.fi>
- Chico, B., et al. (2017). Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. *Materials*, 10(6), 601. <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/601>
- Hobbacher, A. F. (2008). *IIW recommendations for fatigue design of welded joints and components*. International Institute of Welding. <https://iiwelding.org>
- Hobbacher, A. F. (2009). The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.10.003>
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO 5817:2023. Fusion-welded joints — Quality levels for imperfections*. <https://www.iso.org/standard/78912.html>
- Liang, C. F. (2001). Atmospheric corrosion of steels in China. *Journal of Electrochemistry*, 7(2), 215–219. <https://jelectrochem.xmu.edu.cn/journal/vol7/iss2/6/>
- Maddox, S. J. (1991). *Fatigue strength of welded structures*. Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9781855730884>
- Manson, S. S. (1953). Behavior of materials under conditions of thermal stress. In *Heat Transfer Symposium* (pp. 9–75). University of Michigan Engineering Research Institute. <https://deepblue.lib.umich.edu>
- Morcillo, M., Chico, B., Díaz, I., & Cano, H. (2013). Atmospheric corrosion data of carbon steel in Europe. *Corrosion Science*, 77, 6–24. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.08.021>
- Neuber, H. (1961). Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. *Journal of Applied Mechanics*, 28, 544–550. <https://doi.org/10.1115/1.3641780>
- Steimbregger, C. (2017). Fatigue strength assessment of butt-welded joints with undercuts. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0462-4>
- Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Fatigue of engineering materials and structures*. Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com>
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/9780521578479>
- Auremo. (б.д.). *Сталь ВСт3сп: предел выносливости ($\sigma_{-1} = 191$ МПа при $N = 1 \times 10^7$; гладкий образец)*. <https://auremo.biz> // Auremo. (n.d.). *Сталь VСт3сп: предел выносливости ($\sigma_{-1} = 191$ МПа при $N = 1 \times 10^7$; гладкий образец)* [VСт3сп steel: Fatigue limit ($\sigma_{-1} = 191$ МПа at $N = 1 \times 10^7$; smooth specimen)]. <https://auremo.biz> (In Russ.)
- НТТЗМ. (б.д.). *Сталь 09Г2С: предел выносливости $\sigma_{-1} = 235$ МПа*. <https://www.nittzmet.ru> // НТТЗМ. (n.d.). *Сталь 09Г2С: предел выносливости $\sigma_{-1} = 235$ МПа* [09Г2С steel: Fatigue limit $\sigma_{-1} = 235$ МПа]. <https://www.nittzmet.ru> (In Russ.)
- ООО «Сталь Максимум». (б.д.). *Сталь Ст3пс: справочные данные. Раздел «Предел выносливости»*. <https://stalmax.ru> // ООО «Сталь Максимум». (n.d.). *Сталь Ст3пс: справочные данные. Раздел «Предел выносливости»* [St3ps steel: Reference data. “Fatigue limit” section]. <https://stalmax.ru> (In Russ.)
- Усенкулов, Ж. А. (1988). Коррозионное поведение строительных сталей в агрессивной промышленной атмосфере. *Наука и образование Южного Казахстана*. Шымкент. // Ussenkulov, Zh. A. (1988). Korroziyonnoe povedenie stroitel'nykh staley v agressivnoy promyshlennoy atmosfere [Corrosion behavior of structural steels in an aggressive industrial atmosphere]. *Nauka i obrazovanie Yuzhnogo Kazakhstan* [Science and Education of Southern Kazakhstan]. Shymkent. (In Russ.)

- Усенкулов, Ж., & Городецкий, В. К. (1993). Метод прогнозирования коррозии стальных конструкций в промышленной атмосфере. В *Трудах Международной научно-технической и учебно-методической конференции «Актуальные проблемы науки, технологии, производства и образования»* (Т. 2, с. 143). Шымкент: Казахский химико-технологический институт. // Ussenkulov, Zh., & Gorodetskiy, V. K. (1993). Metod prognozirovaniya korrozii stal'nykh konstruktsey v promyshlennoy atmosfere [Method for predicting corrosion of steel structures in an industrial atmosphere]. In *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy i uchebno-metodicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy nauki, tekhnologii, proizvodstva i obrazovaniya»* [Proceedings of the International Scientific, Technical and Educational-Methodical Conference "Actual Problems of Science, Technology, Production and Education"] (Vol. 2, p. 143). Shymkent: Kazakh Chemical-Technological Institute. (In Russ.)
- Усенкулов, Ж. А., & Дүйсенбеков, Б. (2008). Экспериментальные исследования коррозионной стойкости строительных сталей и защитных поверхностных покрытий. *Научные труды Южно-Казахстанского государственного университета им. М. Ауэзова*, 16, 16–20. // Ussenkulov, Zh. A., & Duisenbekov, B. (2008). Eksperimental'nye issledovaniya korrozionnoy stoykosti stroitel'nykh staley i zashchitnykh poverkhnostnykh pokrytiy [Experimental studies of corrosion resistance of structural steels and protective surface coatings]. *Nauchnye trudy Yuzhno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo universiteta im. M. Auezova* [Scientific Works of M. Auezov South Kazakhstan State University], 16, 16–20. (In Russ.)

Авторлар туралы мәліметтер

Информация об авторах

Information about authors



Усенкулов Женисбек Амантаевич – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, М.Ауэзов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан,

Усенкулов Женисбек Амантаевич – кандидат технических наук, профессор, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан,

Ussenkulov Zhenisbek Amantaevich – Candidate of Technical Sciences, professor, South Kazakhstan Research University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan

e-mail: alem505@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0970-9106>



Сайпов Жақсылық Мұхамметұлы – техника ғылымдарының магистрі, докторант, М.Ауэзов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан,

Сайпов Жаксылык Мухамметұлы – магистр технических наук, докторант, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан,

Saipov Zhaksylyk Mukhammethuly – Master of Engineering Sciences, PhD doctoral student, South Kazakhstan Research University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan

e-mail: Saipovzh@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4920-3841>



Усенкулова Шолпан Женисбекқызы – доктор PhD, қауымдастырылған профессор, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Астана қ., Қазақстан.

Усенкулова Шолпан Женисбековна – доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский университет бизнеса и технологий имени К. Кулажанова, г. Астана, Казахстан.

Ussenkulova Sholpan Zhenisbekovna – PhD, associate professor Kazakh university of business and technology named K.Kulazhanov, Astana, Republic of Kazakhstan.

e-mail: sholpan_1990@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9417-755X>



Досалиев Қанат Серікұлы – PhD доктор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан.

Досалиев Қанат Серікұлы – доктор PhD, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан.

Dossaliyev Kanat Serikuly – PhD, M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan

e-mail: dosaliev_k@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5423-9231>



Дүйсенбеков Болат Камбарович – PhD доктор, қауымдастырылған профессор, М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан.

Дуйсенбеков Болат Камбарович – PhD, ассоциированный профессор, Южно-Казахстанский исследовательский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан.

Duisenbekov Bolat Kambarovich – PhD, Associate Professor, South Kazakhstan Research University named after M. Auezov, Shymkent, Republic of Kazakhstan

e-mail: bolat003@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3476-5218>