



XFTAP 53.49.05

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-152-3-231-246>

Бейниттік түрлену механизмі мен бейниттік құрылымды машина жасау болаттарының термиялық беріктендіру сапасы туралы

М.А. Джаксымбетова * ¹, А.Т. Канаев ¹, Б.У. Байхожаева ¹,
Е.Ю. Ремшев ²

¹Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Д.Ф. Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтық мемлекеттік техникалық университеті, Санкт-Петербург, Ресей

E mail: dzhaksymbetov@list.ru

Аңдатпа. Бейнит құрылымдарын талдаудың дәстүрлі әдістерінде бейниттік түрленудің құрылымдық ерекшеліктерін анықтауға және сандық сипаттауға мүмкіндік бермейтін ескірген тәсілдер қолданылған. Сондықтан соңғы жылдары бейнит құрылымы жоғары рұқсатты сканерлеуші электрондық микроскоп және кері электрондық дифракция әдісі арқылы зерттелуде. Бұл әдістер бейниттің әртүрлі микроструктуралық түрлерін жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді. Бейниттік түрлену бірнеше мәрте зерттелгеніне қарамастан, оның механизмі әлі күнге дейін даулы болып қалуда. Даулы болып табылатын мәселелерге жақтарында центрленген кубтық тордың көлемді-орталықтандырылған куб торына айналу механизмі, көміртектің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына алып келетін көміртегі диффузиясының рөлі, сондай-ақ карбидтердің бөліну процестері жатады. Бейнит құрылымы механикалық қасиеттердің сапалық көрсеткіштерін – беріктік, пластикалық қасиеттер мен тұтқырлықты жоғары деңгейде қамтамасыз етеді. Перлитпен, сорбитпен және трооститпен салыстырғанда төменгі бейнит қаттылығы мен беріктігі жоғары бола отырып, пластикалық қасиеттері мен тұтқырлығы да жоғары деңгейде сақталады. Бұл ферриттегі көміртек мөлшерінің жоғары болуымен, бейниттегі дислокация тығыздығының артқандығымен, сондай-ақ дисперстік карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі.

Түйін сөздер: ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуі, кинетика, механизм, аустениттің ыдырауы, изотермиялық, термокинетикалық, микроструктура

Кіріспе

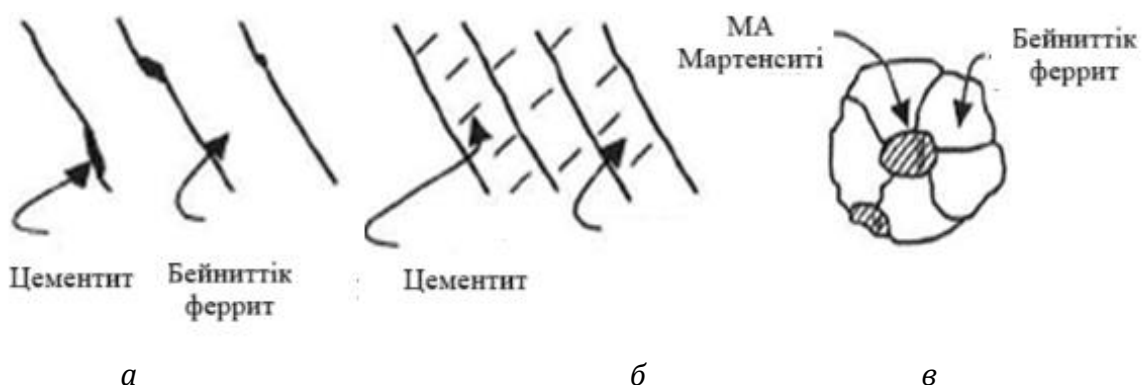
Бейниттік құрылымды машина жасау болаттары жоғары беріктік пен тұтқырлық қасиеттерінің үйлесіміне ие, бұл олардың осындай микроструктурамен дайындалатын машина бөлшектерін өндіруде үлкен сұранысқа ие болуына себеп болады. Сондықтан қазіргі уақытта бейниттік құрылымды ыстықтай илемдеу технологиялық ағынында немесе аустениттік күйге дейін қыздырып, ауамен салқындату арқылы жүзеге асырылатын қарапайым термиялық өңдеу арқылы алу жолдары кеңінен қолданылуда, бұл экономикалық тұрғыдан тиімді болып саналады [1,2].

Бейниттің микроструктурасы ультражұқа феррит түйірлерінен тұрады, олардың түйір шекараларында немесе ішкі бөлігінде екінші фазаның бөлшектері орналасады. Бейнит микроструктурасының ерекшелігі — оның қайталанатын жіңішке параллель кристалдардан немесе түйіршіктерден тұратындығы, олардың типтік ені 0,1–0,5 мкм. Мұндай құрылымды дәстүрлі оптикалық микроскопия әдістерімен сипаттау қиын. Сондықтан бейниттің микро- және субқұрылымын қазіргі уақытта жоғары ажыратымдылықтағы сканерлеуші электрондық микроскоп және кері электрондық дифракция әдісі арқылы зерттейді. Бұл кезде микроструктура элементтері мен түйірлер арасындағы дезориентация бұрыштары өлшенеді, бұл бейниттік ферриттің әртүрлі пішіндерін ажыратуға мүмкіндік береді. Кері электрондық дифракция әдісі арқылы алынған кристаллографиялық бағдарлар сипаттамасы электрондық микроскоппен микроструктураны талдауды толықтырады. Бұл әдістер бейниттің күрделі микроструктурасын жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді. Мұндай жоғары дәлдіктегі микроструктура бейнесінің болуы бейнит құрылымының анықтамасын қайта қарауды және түзетуді талап етеді [3-5]. Бейнит аралас микроструктураның бір бөлігі болып табылады, бұл оның жіктелуін қиындатады. Сондықтан бейниттің микроструктурасы мен механикалық қасиеттері арасындағы өзара байланысты анықтау оңай емес.

Зерттеушілер [6–10] бейниттік микроструктураға тән бірнеше белгілердің бар екенін және олардың механикалық қасиеттермен байланысты екенін атап өтеді. Мысалы, D.V. Edmonds, K.J. Irvine [6,7] еңбектерінде, кристалдық торда атомдардың енуі мен орын алмасу процестері бейниттегі дислокациялар тығыздығының жоғары болуына байланысты болаттың беріктігін арттыратыны көрсетілген. [8–10] жұмыстарда бейниттің беріктігі екі айнымалының функциясы ретінде түсіндіріледі: феррит пластинкасының ені және цементит бөлшектері арасындағы арақашықтық. Алайда бұл параметрлер бір-бірінен тәуелсіз, сондықтан механикалық сынақтар барысында олардың әсерін жеке-жеке ажырату қиын. Бхадеша ұсынған классикалық жіктемеге сәйкес [11], изотермиялық түрленуге ұшыраған болаттар үшін бейнит жоғарғы және төменгі болып екіге бөлінеді. Жоғарғы бейнит реекалы типтегі ферриттен, ал төменгі бейнит пластинкалы типтегі ферриттен тұрады.

Үздіксіз салқындатуға ұшыраған болаттар үшін Браммит пен Спир [12–14] бейнит құрылымының үш түрлі анықтамасын ұсынады: түйір ішілік карбидтік бөлшектері бар бейнит (төменгі бейнит), түйір шекараларында карбидтік бөлшектері бар бейнит (жоғарғы бейнит), екінші фазаның жеке орналасқан бөлшектері бар бейнит (гранулалық бейнит). Төменгі бейнит екі шағын топқа бөлінеді: реекалы типтегі төменгі бейнит аз көміртекті болаттарға тән болса, пластинкалы типтегі төменгі бейнит жоғары көміртекті болаттарға тән. Сондықтан төменгі бейниттің механикалық қасиеттері жоғарғы бейнитпен

салыстырғанда жоғары болады. Бейниттегі карбид бөлшектері перлиттегі сияқты параллель пластинкалар түрінде емес, оқшауланған және қысқа (жіңішке) бөлшектер түрінде бөлінеді. Жоғарғы бейнит деп карбид бөлшектері орнына мартенсит-аустениттік құрамдас бөліктер болатын бейнитті айтады. Жоғарғы бейнитті төменгі бейниттен цементит (карбид) бөлшектерінің таралу сипатымен ажыратуға болады. Жоғарғы бейнитте карбид бөлшектері феррит түйірлері шекараларында орналасады, ал төменгі бейнитте карбид бөлшектері феррит пластинкаларының ішінде орналасып, дислокациялардың қозғалысына анағұрлым күшті кедергі жасайды. Гранулярлық бейнит деп құрамында карбидтер жоқ, көміртеппен қаныққан феррит пен мартенсит-аустениттік құрамдас бөліктерден тұратын бейниттің микроструктурасын айтады (1-сурет).



1-сурет. Бейниттік құрылымдардың морфологиясы мен сыртқы келбетінің сұлбалары.
а – жоғарғы бейнит, б – төменгі бейнит, в – гранулярлық бейнит

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [15]

Бақыланатын илемдеу және жеделдетілген салқындату кезінде аз көміртекті және аз легирленген болаттарда түзілетін бейнит, орта және жоғары көміртекті болаттарда түзілетін бейниттен ерекшеленетіні анықталды. Аз көміртекті болаттарда түзілетін бейнит рекалы құрылымға ие. Жоғары көміртекті болаттардағы бейнитке инелі (пластина тәрізді) құрылым тән.

Бейниттік түрлену механизмі келесі негізгі процестерден тұрады: кристалдық тордың ($\gamma \rightarrow \alpha$) қайта құрылуы, көміртектің қайта бөлінуі және карбидтердің бөлінуі. Бейниттік түрлену бірнеше рет зерттелгеніне қарамастан, оның механизмі әлі күнге дейін даулы күйінде қалып отыр [16].

Келесі маңызды мәселелер даулы болып табылады: 1) жақтарында центрленген кубтық торды көлемді-орталықтандырылған куб торына айналдыру механизмі (кристалдық торлардың қайта құрылуында диффузиялық және диффузиясыз механизмдер қарастырылады); 2) көміртектің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына әкелетін көміртегі диффузиясының рөлі; 3) карбидтің қай фазадан — аустениттен бе, әлде ферриттен бе — бөлінетіні (карбидтердің ферриттен бөлінетініне дәлелдер болғанымен, бұл мәселе бойынша ғылыми пікірталастар жалғасуда).

Көптеген зерттеушілер ферриттің аустениттен мартенситтік механизм бойынша түзілетінін алға тартады. Мұны келесі деректер дәлелдейді:

1) жылтырлатылған бетте рельефтің пайда болуы;

- 2) бейниттік түрленуден кейін қалдық аустениттің болуы;
- 3) төменгі бейнит пен жібітілген мартенситтің микроструктураларының ұқсастығы;
- 4) жоғарғы бейнит пен аз көміртекті мартенситтің микроструктураларының ұқсастығы.

Бейниттік түрлену механизмі перлиттік (диффузиялық) те, мартенситтік (диффузиясыз) те түрленудің белгілеріне ие. Бұл түрленудің салыстырмалы түрде төмен температурада ($\sim 500-250^{\circ}\text{C}$) жүруімен түсіндіріледі. Мұндай жағдайда темір атомдарының диффузиясы баяулайды, ал көміртек атомдарының диффузиясы салыстырмалы түрде оңай өтеді. Бұл құбылыс темірдің атомдық радиусы $r_{\text{Fe}}=0,127\text{нм}$ және көміртектің атомдық радиусы $r_{\text{C}}=0,077\text{нм}$ арасындағы айырмашылықпен (шамамен екі есе) түсіндіріледі [17]. Осы ерекшелік бейниттік түрленуді мартенситтік және перлиттік түрленулерден принципті түрде ажыратады. Оның нәтижесінде бейнит түзіледі – ол көміртекпен сәл артық қаныққан α -тұрақты қатты ерітіндіден (ферриттен) және карбид бөлшектерінен тұратын құрылым болып табылады.

Металлографиялық зерттеулер жоғары үлкейткіштермен жүргізілгенде жоғарғы және төменгі бейнит құрылымдарының бір-бірінен айырмашылығы бар екенін көрсетеді. Жоғарғы бейнит әдетте $\sim 500-350^{\circ}\text{C}$ температуралар аралығында түзіледі және перьелі пішінге ие болады, мұнда карбид бөлшектері перлиттегідей пластинка түрінде емес, оқшауланған жіңішке бөлшектер түрінде бөлінеді (1а-сурет). Төменгі бейнит 350°C -тан мартенситтік түрленудің басталу температурасы M_n ($\sim 260^{\circ}\text{C}$) дейінгі аралықта түзіледі және пластина тәрізді (ине тәрізді) құрылымға ие болады (1б-сурет). Айта кету керек, төменгі бейниттегі карбид бөлшектері α -фаза (феррит) пластинкаларының ішінде орналасады.

Мұқият жүргізілген тәжірибелер бейниттік түрленудің басталуы аустениттегі көміртек атомдарының диффузиялық қайта бөлінуімен сипатталатынын көрсетеді. Бұл аустенитте көміртекке кедей және көміртекке бай аймақтардың түзілуіне әкеледі [18].

Көміртекке кедей аустенит аймақтары ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуге мартенситтік механизм бойынша ұшырайды. Осы кезде түзілетін аз көміртекті мартенсит бірден босатылып, реекалы типтегі бейнит құрылымын түзеді.

Көміртекке бай аустенит аймақтарында карбид бөлшектері бөлінуі мүмкін, бұл осы аймақтардағы көміртек концентрациясының төмендеуіне және жоғарыда көрсетілген мартенситтік механизм бойынша түрленудің жүруіне себеп болады. α -фаза (феррит) мартенситтік механизм арқылы түзілетінін және оның инелі құрылымын микрошлифтер бетіндегі тән рельефтің пайда болуы дәлелдейді.

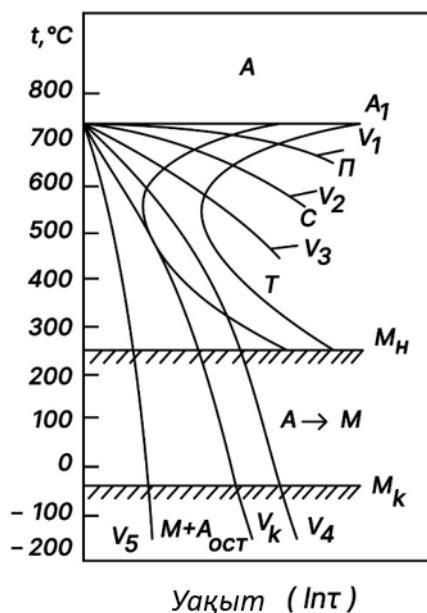
Тәжірибелік зерттеулер көрсеткендей, ($\gamma \rightarrow \alpha$) түрленуден кейін көміртекпен аса қаныққан ферриттен карбид бөлшектері бөлінеді. Жоғарғы және төменгі бейниттің түзілу механизмі, негізінде, бірдей сипатта болады. Айырмашылығы — жоғарғы бейниттің түзілу аймағында алдымен аустенит түйірлерінде көміртек концентрациясының анағұрлым айқын бөлінуі жүреді, бұл аустениттің кейбір аймақтарының көміртекпен едәуір байытылуына және, тиісінше, көміртекке аса кедей ферриттің түзілуіне әкеледі. Осы себепті жоғарғы бейниттің құрылымы ірілеу болады, бұл аустениттен карбидтердің бөлінуімен де байланысты.

Төменгі бейниттің түзілуі кезінде, керісінше, аустениттің көміртекпен байытылуы салыстырмалы түрде аз, ал ферриттің көміртекпен аса қанығуы неғұрлым айқын болады. Бұл карбидтердің феррит кристалдарынан бөлінуіне әкеледі, сондықтан төменгі бейниттің

құрылымы ұсақ түйірлі болады. Бейниттік түрленудің кинетикасы перлиттік түрлену кинетикасына ұқсас, тек инкубациялық кезеңнің болуымен ғана емес, сонымен қатар мартенситтік түрленуге тән маңызды ерекшелігімен де — аустениттің толық жойылуына дейін жетпей, түрленбеген (қалдық) аустениттің сақталуымен сипатталады.

Бейниттік түрлену, перлиттік түрлену сияқты, тек изотермиялық ұстау жағдайында ғана емес, термокинетикалық диаграммаға сәйкес, үздіксіз салқындату кезінде де жүре алады.

Эвтектоидты көміртекті болатты әртүрлі салқындату жылдамдығымен салқындату кезінде түзілетін құрылымдық құрамдастарға салқындату жылдамдығының әсерін көрсететін сызбалық диаграмма 2-суретте берілген. Салқындату жылдамдығы неғұрлым жоғары болып, аустениттің ыдырау температурасы неғұрлым төмен болса, түзілетін феррит-цементиттік құрылым соғұрлым дисперстік болады. Төмен салқындату жылдамдығы кезінде V_1 перлит түзіледі, одан жоғары жылдамдықта V_2 – сорбит, одан да жоғары жылдамдықта V_3 – троостит түзіледі. Көміртекті болатты үздіксіз салқындату кезінде бейнит, әдетте, түзілмейді. Бұл аустениттің ыдырау процесін үздіксіз салқындату жағдайында сипаттау кезінде (аустениттің термокинетикалық диаграммасы) ескерілуі тиіс. Жоғары салқындату жылдамдығы кезінде V_4 аустениттің бір бөлігі M_n (~250°C) температурасына дейін аса суытылады және мартенситке айналады.



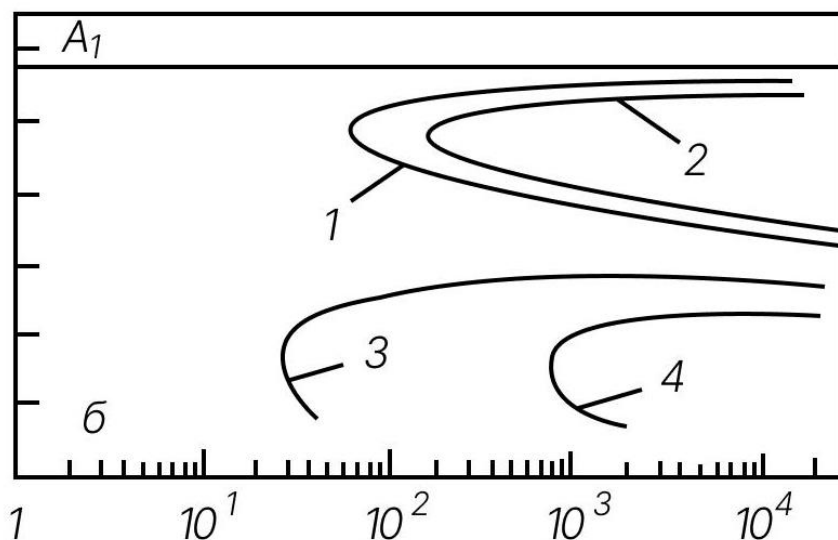
2-сурет. Эвтектоидты болаттың аустенитінің әртүрлі салқындату жылдамдықтарында түрленуінің сызбалық диаграммасы

Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [19]

Бұл жағдайда құрылым троостит пен мартенситтен тұрады. Салқындатудың критикалық жылдамдығында аустениттің перлиттік ыдырауы мүмкін болмайды және аустенит тікелей мартенситке айналады V_5 .

Шынықтырудың критикалық жылдамдығы көміртекті және легирленген болаттар үшін бірдей емес және аустениттің тұрақтылығына байланысты. Аустенит неғұрлым тұрақты болса, шынықтырудың критикалық жылдамдығы соғұрлым төмен болады. Көміртекті болаттар жоғары критикалық шынықтыру жылдамдығына ие ($800\text{--}200^\circ\text{C}/\text{с}$). Ең төмен критикалық шынықтыру жылдамдығы эвтектоидты болатта – $0,8\% \text{ C}$ ($200^\circ\text{C}/\text{с}$). Төмен және орта көміртекті болаттарда ($\sim 0,1\text{--}0,6\% \text{ C}$) критикалық жылдамдық айтарлықтай жоғары ($800\text{--}300^\circ\text{C}/\text{с}$).

Легирленген болаттарда бейниттік түрлену перлиттік түрленуден өзгеше. Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, карбид түзетін элементтермен (Cr, W, Mo және т.б.) легирленген және аса суытылған аустениттің жоғары тұрақтылығына ие болаттарда перлиттік ыдыраудың C-қисықтарының астында бейниттік түрленудің басталуы мен аяқталуының C-қисықтары орналасады. 3-суретте көрсетілгендей, көміртегі мөлшері $0,43\%$ және хром мөлшері $3,52\%$ болатын легирленген болаттың аустенит ыдырау диаграммасында перлиттік және бейниттік түрлену қисықтары температуралық интервалмен бөлінген ($\sim 450\text{--}550^\circ\text{C}$) [16, 18].



3-сурет. Жоғары тұрақтылыққа ие легирленген болат аустенитінің перлиттік және бейниттік түрленуінің температуралық аймақтары (Розе және Петер)
1 – перлиттің түзілуінің басталуы, 2 – перлиттің түзілуінің аяқталуы, 3 – бейниттің түзілуінің басталуы, 4 – перлиттің түзілуінің аяқталуы
Ескерту: деректер негізінде құрастырылған [20]

Әдіснама

Осы зерттеуде бейниттік (изотермиялық) шынықтыруға көміртекті болат ($0,77\% \text{ C}$) және төмен легирленген 30ХГС маркалы болат (ГОСТ 4543-91) ұшыратылды. Бейниттік шынықтыруға арналған селитралы ваннаның құрамы: $50\% \text{ KNO}_3 + 50\% \text{ NaNO}_3$, балқу температурасы — 220°C , жұмыс температурасы — $240\text{--}550^\circ\text{C}$ аралығында.

Бейниттің қаттылығы Роквелл әдісімен өлшенді, мұнда индентора алмаз конусы қолданылады. Механикалық қасиеттері — беріктік шегі (σ_b , МПа) және салыстырмалы ұзаруы (δ_5 , %) — Instron 5966 сынау құрылғысында анықталды, сынамалар ГОСТ 1497-94

«Металдар. Созылу кезіндегі сынау әдістері» стандартына сәйкес дайындалды. Соққы тұтқырлығы (KCU, Дж/см²) ГОСТ 9454-78 «Соғу иілуге сынау әдістері» бойынша маятникті соққы қондырғысында анықталды. Электронды-микроскопиялық зерттеулер үшін JEOLJSM-5910 модельді рентгено-энергетикалық анализаторы бар растауыш (сканерлеуші) микроскоп қолданылды, ол нысан бетінің электронды зондпен сканерленуі нәтижесінде кескін қалыптастырады. Қысқа толқынды электрондық сәулелерді қолдану бұл микроскоптардың айыру қабілетін едәуір арттыруға мүмкіндік береді (үлкейту диапазоны 50 000 есеге дейін), құрылымның ұсақ бөлшектерін зерттеуге жол ашады. Бейниттің дисперстілігі (пластинкалар арасындағы арақашықтық — Δ) 350°C және 240°C температураларда өлшенді. Ферриттегі көміртек мөлшерін анықтау бойынша зерттеулер 300°C, 400°C және 723°C температураларда SPECTROLAB Jr^{CCD} ұшқындық спектрометрінде, спектрді ұшқынмен қоздыру арқылы жүргізілді.

Нәтижелер және талқылау

Бейнит перлитке қарағанда беріктірек, оның беріктік қасиеттері температура төмендеген сайын артады. Бұл феррит түйірлерінің ұсақ болуымен, карбидтердің дисперстік бөлінуімен және дислокациялар тығыздығының жоғары болуымен түсіндіріледі.

Өлшеулер көрсеткендей, 0,77 % C мөлшері бар болаттың бейнитінің Роквелл әдісі бойынша қаттылығы 550–300°C температура аралығында төмендеген сайын мынадай түрде өзгереді (1-кесте).

1-кесте. Болат бейнитінің Роквелл әдісі бойынша қаттылығының өзгеруі

T, °C	550	500	400	300
HRC	45	47	49	55

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Осы болатта изотермиялық түрлену кезінде 550–400°C температура аралығында Роквелл бойынша қаттылығы HRC $\approx$ 45–49 болатын жоғарғы бейнит түзіледі, ал 400–300°C аралығында HRC $\approx$ 55 болатын төменгі бейнит қалыптасады. Бейниттегі феррит перлиттегі ферриттен пішіні мен құрамының ерекшелігімен өзгешеленеді: жоғары температурада ол перьелі формада болса, төмен температурада біртіндеп инелі түрге айналады, сондай-ақ құрамында көміртек мөлшері жоғары болады: $\Phi_{\text{п}}$ - 0,025 % C при 723 °C; $\Phi_{\text{ж.б}}$ - 0,10 % C при 400°C; $\Phi_{\text{т.б}}$ - 0,2% C при 300°C.

Бейниттің дисперстілігін перлиттегі сияқты, феррит пен цементиттің екі көршілес пластинасының қалыңдықтарының қосындысы болып табылатын пластинкалар арасындағы арақашықтық — Δ шамасы арқылы сипаттауға болады. 0,77 % C көміртек мөлшері бар болат үшін температура 550°C-тан 400°C-қа өзгергенде пластинкалар арасындағы арақашықтық іс жүзінде өзгермейді — $0,116 \cdot 10^{-3}$ мм-ден $0,110 \cdot 10^{-3}$ мм-ге дейін; ал 350°C-тан 240°C-қа дейін төмендегенде бұл арақашықтық $0,095 \cdot 10^{-3}$ мм-ден $0,080 \cdot 10^{-3}$ мм-ге дейін азаяды. Жоғарыда айтылғандай, температура төмендеген сайын қаттылық үздіксіз артады — 45 HRC-тан 55 HRC-қа дейін. Төменгі бейнит құрылымына ие болаттар мартенситке шынықтырылған болатпен салыстырғанда жоғары тұтқырлыққа

ие, бұл бейниттік (изотермиялық) шынықтыруды қолдануда үлкен практикалық маңызға ие. 550–450°C температура аралығында жоғарғы бейниттің түзілуі болаттың пластикалылығын перлиттік құрылыммен салыстырғанда төмендетеді (2-кесте).

2-кесте. Жоғары көміртекті болаттың механикалық қасиеттерінің аустениттің феррит-цементиттік құрылымға түрлену температурасына тәуелділігі

$T_{пр}, ^\circ C$	350	450	550	650
Құрылымы	Төменгі бейнит	Төменгі + жоғарғы бейнит	Жоғарғы бейнит	Перлит
$\sigma_B, \text{МПа}$	1510	1390	1315	1090
HRC	50	42	45	26
$\delta_5, \%$	14	11	12	18

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Жоғарғы бейниттің пластикалылығының төмендігі феррит түйірлері шекараларында салыстырмалы түрде ірі карбидтердің бөлінуімен байланысты. Аустениттің ыдырауы нәтижесінде аралық түрленудің төменгі аймағында түзілетін бейнит жоғары деңгейдегі механикалық қасиеттерді – беріктік, қаттылық және пластикалылықты – қамтамасыз етеді. Бұл бейнит ферритіндегі көміртек мөлшерінің жоғары болуымен, дислокациялар тығыздығының артуымен және осы фазаның түйірлерінде орналасқан дисперстік карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі. Бейниттің ағым шегі феррит түйірлерінің өлшемімен Холл–Петч қатынасы бойынша байланысты, өйткені феррит шекаралары дислокациялардың қозғалысына тиімді тосқауыл болып табылады [21].

Изотермиялық түрлену температурасы бейниттік аралықта төмендеген сайын, α/γ шекарасынан көміртек атомдарының баяу шығуына байланысты феррит түйірлері ұсақ түзіледі. Бұл бейниттің беріктік қасиеттерінің артуының басты себептерінің бірі болып табылады. Ферриттің ішінде орналасқан карбид бөлшектері дислокациялардың қозғалысын неғұрлым тиімді тежейді, егер олардың көлем бірлігіндегі саны көп болса.

Жоғарғы бейнитте карбид бөлшектері негізінен феррит түйірлері шекараларында орналасады, сондықтан олар беріктендіруге айтарлықтай үлес қоспайды. Түрлену температурасы төмендеген сайын карбидтердің дисперстілігі артып, олар негізінен феррит түйірлерінің ішінде орналасады, бұл бейниттің беріктігін арттырады. Бейниттегі феррит эвтектоидтыға дейінгі болаттағы артық ферритпен салыстырғанда дислокациялар тығыздығының жоғары болуымен ерекшеленеді. Ферриттегі дислокациялар көміртек атомдарынан құралған Коттрелл атмосфераларымен бекітіледі және олар беріктендіруге елеулі үлес қосады.

Феррит түйірлері шекараларында орналасқан карбид бөлшектері бейниттің пластикалылығын төмендетеді. Ал төменгі бейнитте карбид бөлшектері α -фазаның ішінде орналасады, бұл жоғары пластикалылықты қамтамасыз етеді [22–24]. Бейниттік құрылым алу бейниттік (изотермиялық) шынықтырудың негізінде жатыр, ол машина жасау болаттарынан (30ХГС, 9ХС, ХВГ) жасалған бөлшектерге беріктік беретін термиялық өңдеуде кеңінен қолданылады. Алайда бейниттік шынықтырудың кемшілігі — ыстық ортада салқындату жылдамдығының төмендігі, бұл оның қолданылуын кіші қималы бұйымдармен шектейді.

Бейниттік шынықтырудың маңызды артықшылықтарының бірі — шынықтыру

кернеулері мен бұйымның деформациясын едәуір төмендету. Мұндай болаттарды бейниттік шынықтыру жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз етеді және мартенситке шынықтыру мен кейінгі босатумен салыстырғанда ойыққа сезімталдықты күрт азайтады. Сондықтан бейниттік шынықтыру машина жасау болаттарының конструкциялық беріктігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл 30ХГС болатының әдеттегі шынықтыру мен босатудан кейінгі және бейниттік шынықтырудан кейінгі қасиеттерін салыстырған 3-кестедегі деректермен расталады.

3-Кесте. 30ХГС болатының қалыпты және бейниттік шынықтырудан кейінгі қасиеттері

Термиялық өңдеу	σ_B , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	KCU, Дж/см ²
880 °C суда шынықтыру, 520 °C босату	1100	850	45
Майда шынықтыру, 500 °C босату	1200	1140	78
Майда шынықтыру, 300 °C босату	1630	1520	69
300°C селитрада ұстап 880°C бейниттік шынықтыру	1650	1300	60

Ескерту: жүргізілген зерттеу негізінде құрастырылған

Қорытынды

1. Бейниттік түрлену механизмін талдауда бұрын қолданылған тәсілдер ескірген болып табылады. Практика көрсеткендей, олар бейнит құрылымының ерекшеліктерін анықтап, сандық тұрғыда сипаттауға қабілетсіз. Сондықтан соңғы жылдары бейниттің микроструктурасы мен материал қасиеттері арасындағы өзара байланысты дәлірек сипаттау үшін жоғары айқындықтағы сканерлеуші электрондық микроскоп пен кері электрондық дифракция әдісі қолданылады. Бұл әдістер бейниттің күрделі микроструктурасын жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік береді.

2. Бейниттік түрлену келесі негізгі процестерден тұрады: ($\gamma \rightarrow \alpha$) кристалдық тордың қайта құрылуы; аустениттегі көміртегі атомдарының қайта таралуы; көміртегімен қаныққан аустениттен карбидтің бөлінуі. Бейниттік түрлену бірнеше рет зерттелгенімен, оның механизмі әлі күнге дейін даулы болып табылады.

3. Келесі маңызды мәселелер даулы болып табылады: 1) жақтарында центрленген кубтық торды көлемді-орталықтандырылған куб торына айналдыру механизмі (кристалдық торлардың қайта құрылуында диффузиялық және диффузиясыз механизмдер қарастырылады); 2) көміртегінің қайта бөлінуіне және көміртегімен қаныққан ферриттің пайда болуына әкелетін көміртегі диффузиясының рөлі; 3) карбидтің қай фазадан — аустениттен бе, әлде ферриттен бе — бөлінетіні (карбидтердің ферриттен бөлінетініне дәлелдер болғанымен, бұл мәселе бойынша ғылыми пікірталастар жалғасуда).

4. Бейнит құрылымы жоғары механикалық қасиеттермен ерекшеленеді: беріктік, пластикалық және тұтқырлық. Перлитпен, сорбитпен және трооститпен салыстырғанда, төменгі бейнит жоғары қаттылық пен беріктікке, сондай-ақ жақсы пластикалық пен тұтқырлыққа ие. Мұндай қасиеттер бейниттің α -фазасында көміртегі мөлшерінің жоғары болуымен, дислокация тығыздығының артуымен және осы фазадағы кристалдардың ішінде дисперстік күйде орналасқан карбидтердің түзілуімен түсіндіріледі.

5. Бейниттік шынықтырудың маңызды артықшылықтарының бірі – қалдық кернеулер мен бұрмаланудың айтарлықтай азаюы, бұл термиялық өңдеу сапасын едәуір арттырады. Сонымен қатар, бейниттік шынықтыру жоғары соққы тұтқырлығын қамтамасыз етіп, мартенситке шынықтырылған және жібітілген болатпен салыстырғанда бұйымның ойыққа сезімталдығын төмендетеді. Бұл болаттың конструкциялық беріктігін арттыруға мүмкіндік береді.

Авторлар қосқан үлесі

М.А. Жақсылымбетова – Концепциялау, Әдістеме, Алғашқы нұсқасын жазу.

А.Т. Қанаев – Деректерді жинақтау, Формальды талдау, Валидация.

Б.У. Байқожаева – Визуализация, Зерттеу, Редакциялау және түзету.

Е.Ю. Ремшев – Ғылыми жетекшілік, Жобаны басқару, Ресурстар.

Әдебиеттер тізімі

1. Kanaev A.T., Bogomolov A.V., Kanaev A.A., Reshotkina E.N. Influence of Intermittent Quenching and Self-Tempering on the Mechanical Properties of Rebar Steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol.48(2). – P. 130-134. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079> - конференция материалдары
2. Qin X., Cheng C., Li Y., Zhang C., Jin Y., Numerical study on a new swirling flow pocket brick for tundish upper nozzle during continuous casting of steel // Ironmaking& Steelmaking. – 2023. - Vol. 50. – P. 1489-1501. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2266262> - конференция материалдары
3. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I., Mazur I., Akhmedyanov A., Kirgizbayeva K. Improvement of the Mechanical Properties of Reinforcing Bar Steel by Combined Deformation-Heat Treatment // International Review of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 16(9). – P. 460–466. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521> - конференция материалдары
4. Zhakupova A., Zhakupov A., Bogomolov A. Research of Initial Billets Structure for Seamless Pipe Production // International Review of Mechanical Engineering. - 2024. – Vol. 18. – P. 50-61. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i8.25704> - конференция материалдары
5. Jayakrishna P., Chakraborty S., Ganguly S. and Talukdar P. Modelling of thermofluidic behaviour and mechanical deformation in thin slab continuous casting of steel: an overview // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2021. - Vol. 60. – P. 320-349. DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2021.2014712> - конференция материалдары
6. Furumai K., Aramaki N., Oikawa K. Influence of heat flux different between wide and narrow face in continuous casting mould on unevenness of hypo-peritectic steel solidification at off-corner // Ironmaking& Steelmaking. – 2022. - Vol. 49. - P. 845-859. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2063654> - конференция материалдары
7. Allaoui A., Guedri A., Darsouni L., Belyamna M. Fracture Mechanisms of C-Mn(V-Nb-Ti) Microalloyed Steel Under a Decreasing Temperature Cycle // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2023. – Vol. 17(10). – P. 495-501. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i10.23853> - конференция материалдары
8. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range // Materials Today:

- Proceedings. 2021. - Vol. 38. – P. 1322-1325.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093> - конференция материалдары
9. Murillo-Marrodán A., Gamin Y., Kaputkina L., García E., Aleshchenko A., Derazkola H., Pashkov A., Belokon E. Microstructural and mechanical analysis of seamless pipes made of superaustenitic stainless steel using cross-roll piercing and elongation // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. - Vol. 7(5). – P. 700-707.
DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7050185> - конференция материалдары
10. Shahidul M. I., Malcolm M. L., Hashmi M.S.J., Alhaji M. H. Waste resources recycling in achieving economic and environmental sustainability: review on wood waste industry // Proc. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 964-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11275-5> - конференция материалдары
11. Wu X., Chen L., Li H., Xu J. Experimental study of the mechanical properties of reinforced concrete compression members under the combined action of sustained load and corrosion // Construction and Building Materials. – 2019. - Vol. 202. – P. 11-22.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.156> - конференция материалдары
12. Joshua O., Olusola K. O., Oyeyemi K. D., Ogunde A. O., Amusan L. M., Nduka D. O. Data of the properties of rebar steel brands in Lagos // Nigerian market used in reinforced concrete applications, Data in Brief. 2018. - Vol. 17. – P. 1428-1431.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.083> - конференция материалдары
13. Kanaev A. T., Bogomolov A. V., Kanaev A. A., Reshotkina E. N. Influence of intermittent quenching and self-tempering on the mechanical properties of rebar steel // Steel in Translation. – 2018. - Vol. 48(2). – P.130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079> - конференция материалдары
14. Alhassan M., Al-Rousan R., Hejazi M. Novel Nonlinear Model for Analysis of RC Slabs with Various Boundary Conditions Under Monotonic Loading // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol.9(6). – P.218-233.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i6.15558> - конференция материалдары
15. Ahmed, A., Ali, M., Abbas, A. Recycling of Disposal Syringe Needles to Produce Fiber Reinforced Concrete // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol. 9 (4). – P. 148-153. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.15275> - конференция материалдары
16. Ali A., Chiang Y.W., Santos R.M. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization // A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. Minerals. – 2022. – Vol. 12(2), 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020205> - конференция материалдары
17. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences This link is disabled. – 2021. – Vol. 3(447). – P. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.64> - конференция материалдары
18. Lahtin YU.M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals] (Moscow: Metallurgiya, 1984, 360 p.) [in Russian] - кітап
19. Al-Quraishi H., Abdulkhudhur R., Abdulazeez A. Shear Strength Behavior of Fiber

- Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2021. – Vol. 12 (5). – P. 314-322.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v12i5.19972> - конференция материалдары
20. Gadalov, V. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of Metals, Powder Materials and Coatings Obtained by Spark Discharge Methods] (Moscow: Infra-M, 2011, 468 p.) [in Russian] - кітап
21. Sapountzakis E. An Improved Model for the Analysis of Plates Stiffened by Parallel Beams Including Creep and Shrinkage Effects: Application to Concrete or to Composite Steel-Concrete Structures // International Journal on Engineering Applications (IREA). 2018. – Vol. 6 (2). P. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.15866/irea.v6i2.15377> - конференция материалдары
22. Kanaev A.T., Muhambetov D.G., Kanaev A.A. Mekhanizmy uprochneniya ferrito-perlitnykh stalej [Mechanisms of Strengthening of Ferrite-Pearlite Steels] // Aktualnye problemy mashinostroeniia i metallurgii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual Problems of Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference] (Almaty, 2002, pp. 14–18) [conference proceedings, in Russian] - конференция материалдары
23. Achamyeh T., Sahin Y. Investigation of mechanical properties of ribbed reinforcement steel bars. a case study on ethiopian construction industry // International Journal of Steel Structures. 2019. – Vol. 19(5). – P.1682-1693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00236-0> - конференция материалдары
24. Sangmin S., Seungchan C., Donghyun L., Yangdo K., Sang-Bok L., Sang-Kwan L., Ilguk J. Microstructural evolution and strengthening mechanism of sic/al composites fabricated by a liquid-pressing process and heat treatment // Materials. 2019. Vol. 12(20). P.3374. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12203374> - конференция материалдары

**М.А. Джаксымбетова^{*1}, А.Т. Канаев¹, Б.У. Байхожаева¹,
Е.Ю. Ремшев²**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Д.Ф. Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтық мемлекеттік техникалық университеті,
Санкт-Петербург, Ресей

О механизме бейнитного превращения и качестве термоупрочнения машиностроительных сталей с бейнитной структурой

Аннотация. В традиционных методах анализа структур бейнита использовались устаревшие подходы, с помощью которых сложно идентифицировать и количественно характеризовать особенности структур бейнитного превращения. Поэтому в последние годы структура бейнита изучается с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения и метода обратной дифракции электронов. Эти методы позволяют характеризовать различные типы бейнитных микроструктур с высокой точностью. В работе приведены краткий анализ исследований механизма бейнитного превращения последних лет и экспериментальные результаты, полученные авторами при бейнитной закалке в машиностроительных сталях. Подчеркнуто, что несмотря на неоднократные

исследования механизм бейнитного превращения все еще остается дискуссионным. Спорными являются механизм превращения ГЦК решетки в ОЦК, роль диффузии углерода, приводящая к его перераспределению и образованию феррита, пересыщенного углеродом, а также процессы выделения карбидов. Бейнит обеспечивает высокий уровень качественных показателей механических свойств: прочности, пластичности и вязкости. По сравнению с перлитом, сорбитом и трооститом нижний бейнит имеет более высокую твердость и прочность при высокой пластичности и вязкости. Это объясняется повышенным содержанием углерода в феррите и большей плотностью дислокации в бейните, а также образованием дисперсных карбидов.

Ключевые слова: ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращение, кинетика, механизм, распад аустенита, изотермический, термокинетический, микроструктура.

**M.A. Jaxsymbetova*¹, A.T. Kanaev¹, B.U. Baikhozhayeva¹,
E.Yu. Remshev²**

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²Baltic State Technical University "VOENMECH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

On the mechanism of bainitic transformation and the quality of heat treatment in engineering steels with a bainitic structure

Abstract. Traditional approaches to analyzing bainitic structures often rely on outdated methods, which pose challenges for the accurate identification and quantitative characterization of the features of bainitic transformation. In recent years, therefore, high-resolution scanning electron microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD) techniques have been increasingly employed to study bainite structures. These advanced methods enable precise characterization of various types of bainitic microstructures. This paper presents a brief review of recent studies on the mechanism of bainitic transformation, along with the authors' own experimental findings from bainitic hardening of engineering steels. It is emphasized that, despite numerous investigations, the bainitic transformation mechanism remains a subject of ongoing debate. Unresolved issues include the transformation of the face-centered cubic (FCC) lattice into body-centered cubic (BCC), the role of carbon diffusion leading to its redistribution and the formation of carbon-supersaturated ferrite, as well as the processes of carbide precipitation. Bainite provides a high level of mechanical performance in terms of strength, ductility, and toughness. Compared to pearlite, sorbite, and troostite, lower bainite exhibits higher hardness and strength while maintaining excellent ductility and toughness. These properties are attributed to the higher carbon content in ferrite, increased dislocation density in bainite, and the formation of fine carbide precipitates.

Keywords: ($\gamma \rightarrow \alpha$) transformation, kinetics, mechanism, austenite decomposition, isothermal, thermokinetic, microstructure.

References

1. Kanaev A.T., Bogomolov A.V., Kanaev A.A., Reshotkina E.N. Influence of Intermittent

- Quenching and Self-Tempering on the Mechanical Properties of Rebar Steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol.48(2). – P. 130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079>
2. Qin X., Cheng C., Li Y., Zhang C., Jin Y., Numerical study on a new swirling flow pocket brick for tundish upper nozzle during continuous casting of steel // Ironmaking& Steelmaking. – 2023. – Vol. 50. – P. 1489-1501. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2266262>
 3. Jaxymbetova M., Kanayev A., Kossanova I., Mazur I., Akhmedyanov A., Kirgizbayeva K. Improvement of the Mechanical Properties of Reinforcing Bar Steel by Combined Deformation-Heat Treatment // International Review of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 16(9). – P. 460–466. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v16i9.21521>
 4. Zhakupova A., Zhakupov A., Bogomolov A. Research of Initial Billets Structure for Seamless Pipe Production // International Review of Mechanical Engineering. – 2024. – Vol. 18. – P. 50-61. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i8.25704>
 5. Jayakrishna P., Chakraborty S., Ganguly S. and Talukdar P. Modelling of thermofluidic behaviour and mechanical deformation in thin slab continuous casting of steel: an overview // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2021. – Vol. 60. – P. 320-349.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2021.2014712>
 6. Furumai K., Aramaki N., Oikawa K. Influence of heat flux different between wide and narrow face in continuous casting mould on unevenness of hypo-peritectic steel solidification at off-corner // Ironmaking& Steelmaking. – 2022. – Vol. 49. – P. 845-859.
DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2063654>
 7. Allaoui A., Guedri A., Darsouni L., Belyamna M. Fracture Mechanisms of C-Mn(V-Nb-Ti) Microalloyed Steel Under a Decreasing Temperature Cycle // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2023. – Vol. 17(10). – P. 495-501.
DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v17i10.23853>
 8. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range // Materials Today: Proceedings. 2021. – Vol. 38. – P. 1322-1325.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093>
 9. Murillo-Marrodán A., Gamin Y., Kaputkina L., García E., Aleshchenko A., Derazkola H., Pashkov A., Belokon E. Microstructural and mechanical analysis of seamless pipes made of superaustenitic stainless steel using cross-roll piercing and elongation // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7(5). – P. 700-707.
DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7050185>
 10. Shahidul M. I., Malcolm M. L., Hashmi M.S.J., Alhaji M. H. Waste resources recycling in achieving economic and environmental sustainability: review on wood waste industry // Proc. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. – 2020. – P. 964-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11275-5>
 11. Wu X., Chen L., Li H., Xu J. Experimental study of the mechanical properties of reinforced concrete compression members under the combined action of sustained load and corrosion // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 202. – P. 11-22.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.156>
 12. Joshua O., Olusola K. O., Oyeyemi K. D., Ogunde A. O., Amusan L. M., Nduka D. O. Data of the properties of rebar steel brands in Lagos // Nigerian market used in reinforced concrete applications, Data in Brief. 2018. – Vol. 17. – P. 1428-1431.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.01.083>
13. Kanaev A. T., Bogomolov A. V., Kanaev A. A., Reshotkina E. N. Influence of intermittent quenching and self-tempering on the mechanical properties of rebar steel // Steel in Translation. – 2018. – Vol. 48(2). – P.130-134.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020079>
 14. Alhassan M., Al-Rousan R., Hejazi M. Novel Nonlinear Model for Analysis of RC Slabs with Various Boundary Conditions Under Monotonic Loading // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol.9(6). – P.218-233.
DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i6.15558>
 15. Ahmed, A., Ali, M., Abbas, A. Recycling of Disposal Syringe Needles to Produce Fiber Reinforced Concrete // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2018. – Vol. 9 (4). – P. 148-153. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.15275>
 16. Ali A., Chiang Y.W., Santos R.M. X-ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization // A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. Minerals. – 2022. – Vol. 12(2), 205. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020205>
 17. Kanayev A.T., Jaxymbetova M.A., Kossanova I.M. Quantitative assessment of the yield stress of ferrite-pearlitic steels by structure parameters // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences This link is disabled. – 2021. – Vol. 3(447). – P. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.64>
 18. Lahtin YU.M. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals] (Moscow: Metallurgiya, 1984, 360 p.) [in Russian]
 19. Al-Quraishi H., Abdulkhudhur R., Abdulazeez A. Shear Strength Behavior of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete Beams // International Review of Civil Engineering (IRECE). 2021. – Vol. 12 (5). – P. 314-322. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v12i5.19972>
 20. Gadalog, V. N. Metallografiya metallov, poroshkovykh materialov i pokrytij, poluchennykh elektroiskrovymi sposobami [Metallography of Metals, Powder Materials and Coatings Obtained by Spark Discharge Methods] (Moscow: Infra-M, 2011, 468 p.) [in Russian]
 21. Sapountzakis E. An Improved Model for the Analysis of Plates Stiffened by Parallel Beams Including Creep and Shrinkage Effects: Application to Concrete or to Composite Steel-Concrete Structures // International Journal on Engineering Applications (IREA). 2018. – Vol. 6 (2). P. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.15866/irea.v6i2.15377>
 22. Kanaev A.T., Muhambetov D.G., Kanaev A.A. Mekhanizmy uprochneniya ferrito-perlitnykh stalej [Mechanisms of Strengthening of Ferrite-Pearlite Steels] // Aktualnye problemy mashinostroeniia i metallurgii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual Problems of Mechanical Engineering and Metallurgy: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference] (Almaty, 2002, pp. 14–18) [conference proceedings, in Russian]
 23. Achamyeleh T., Sahin Y. Investigation of mechanical properties of ribbed reinforcement steel bars. a case study on ethiopian construction industry // International Journal of Steel Structures. 2019. – Vol. 19(5). – P.1682-1693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00236-0>
 24. Sangmin S., Seungchan C., Donghyun L., Yangdo K., Sang-Bok L., Sang-Kwan L., Ilguk J. Microstructural evolution and strengthening mechanism of sic/al composites fabricated by

a liquid-pressing process and heat treatment // Materials. 2019. Vol. 12(20). P.3374. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12203374>

Авторлар туралы мәлімет

Джаксымбетова М.А. - хат-хабар авторы, философия докторы (PhD), Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының аға оқытушысы

Канаев А.Т. - т.ғ.д, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының профессоры

Байхожаева Б.У. - т.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының меңгерушісі

Ремшев Е.Ю. - т.ғ.к., Д.Ф.Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтика мемлекеттік техникалық университетінің доценті, Красноармейская көшесі, 1, 190005, Санкт-Петербург, Ресей.

Джаксымбетова М.А. - автор для корреспонденции, доктор философии (PhD), старший преподаватель кафедры "Стандартизация, сертификация и метрология" Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева"

Канаев А.Т. - д.т.н., профессор кафедры "Стандартизация, сертификация и метрология" Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева

Байхожаева Б.У. - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, сертификация и метрология» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева

Ремшев Е.Ю. - к.т.н., доцент БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, улица Красноармейская, 1, 190005, Санкт-Петербург, Россия.

Jaxymbetova M.A. - corresponding author, PhD, Senior Lecturer of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Kanayev A.T. - d.t.s., Professor of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Baikhozhayeva B.U. - d.t.s., professor, head of the Department of Standardization, Certification and Metrology, L.N. Gumilyov Eurasian National University

Remshev Ye. U.- c.t.s., associate professor of the BSTU "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov, Krasnoarmeiskaya str., 1, 190005, Saint Petersburg, Russia.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).