



МРНТИ 73.29.41

Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-150-1-173-185>

## Плазмалық шынықтыру кезінде құрылымдық болатта градиентті-қабатты құрылымның қалыптасуы

Т.Е. Сарсембаева\*<sup>1</sup>, А.Т. Канаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

<sup>2</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

(E-mail: [tolkyn\\_adil@mail.ru](mailto:tolkyn_adil@mail.ru))

**Аңдатпа.** Плазмалық шынықтыру процесіндегі конструкциялық болаттың құрылымдық ерекшеліктері зерттелді. Беттік аймақта жылдам қыздыру және салқындату кезінде шыңдалған аймақтың кесіндісінде аустенит түрленуінің ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) әртүрлі механизмдерімен анықталатын градиентті-қабатты құрылым түзілетіні көрсетілген. Беттік аймақта диффузиясыз мартенситтік түрленудің дамитыны анықталды, бұл ине тәріздес мартенситтің пайда болуына әкеледі. Төменгі қабаттарда аустениттің ыдырауы диффузия процесімен және әр түрлі дисперстік дәрежедегі пластиналы феррит-карбидті қоспаның одан әрі түзілуімен бірге жүреді. Салқындату жылдамдығы неғұрлым жоғары болса, алынған феррит-карбидті қоспасы дисперсті болады, соғұрлым пластина аралық қашықтық аз болатыны көрсетілген. Бұл дисперсия дәрежесінің жоғарылауымен беріктік сипаттамаларының (беріктік –  $\sigma_b$ , қаттылығы – НВ) жоғарылауына, ал пластикалық сипаттамалардың (салыстырмалы ұзару –  $\delta$  және жиырылуы –  $\psi$ ) төмендеуіне әкеледі.

Болаттың беткі қабатында градиентті-қабатты құрылымның қалыптасуы мартенситті құрылымдардан троосто-мартенситті және аралас пластиналы құрылымдарға (троостит, сорбит) күрт өту шекарасының түзілуін жоюға мүмкіндік беретіні атап өтілген, оның көмегімен болаттың жанасу-шаршау беріктігін арттыруға болатын маңызды факторлардың бірі болаттың жарыққа төзімділігіне ықпал ете түседі.

**Түйін сөздер:** болатты доңғалақ, плазмалық шынықтыру, құрылымның қалыптасуы, түзілу механизмдері, біртекті емес құрылымдар, құрылымдардың дисперсиясы, механикалық қасиеттері.

Түсті 18.09.2024. Жөнделді 18.01.2025. Мақұлданды 04.02.2025. Онлайн қолжетімді 31.03.2025

\*хат-хабар үшін автор

## Кіріспе

Соңғы жылдары зерттеушілердің назары металдан жасалған материалдарды беріктендіретін әртүрлі термиялық өңдеудегі градиентті-қабатты құрылымдардың қалыптасуы мен даму заңдылықтарын тәжірибелік зерттеуге көбірек аударылуда.

Бұл олардың өзектілігін көрсетеді және бір жағынан градиент-қабатты құрылымдардың қалыптасуы мен дамуында жүретін процестердің физикалық табиғаты аз зерттелгендігімен түсіндіріледі, екінші жағынан градиент-қабатты құрылымдар болаттар мен қорытпаларға жаңа, бұрын белгісіз қасиеттер береді.

Атап айтқанда, плазмамен шыңдалған құрылымдық болаттың беткі қабатында градиентті-қабатты құрылымның қалыптасуы мартенситті құрылымдардан троостомартенситті және аралас пластиналы құрылымдарға (троостит, сорбит) күрт өту шекарасының қалыптасуын жоюға мүмкіндік беретіні атап өтілген). Бұл фактор негізгі болып саналады, ол болатты доңғалақтың контактілі шаршау беріктігі мен жарықшаларға төзімділік деңгейін арттыра алады.

Машиналар мен механизмдердің қатты жүктелген бөлшектері мен тораптарының тозуға төзімділігін және жанасу шаршауына төзімділігін арттыру үшін жүзеге асырылатын беттік плазмалық шынықтыру (қатайту) кезінде пайда болатын градиентті қабатты құрылымдар ерекше қызығушылық тудырады. Бұл көп жағдайда ішкі қабаттардағы бастапқы қасиеттерін сақтай отырып, бөлшектің ең көп жүктелген жұмыс бетін ғана нығайтқанда жергілікті термиялық өңдеудің техникалық және экономикалық тұрғыдан негізделгендігімен түсіндіріледі [1]. Плазма материалдың бетіне әсер еткенде, температура градиентінің әсерінен күрделі кернеу күйінің беткі қабаттарында пайда болуына әкелетін бірқатар физика-химиялық процестер жүреді. Жиынтықта бұл процестер өңделетін материалдың беткі қабатында көп қабатты құрылымның қалыптасуына ықпал етеді, бұл осындай құрылымның қалыптасу және даму ерекшеліктерін және болатты доңғалақтың тиісті физикалық-механикалық және қызметтік қасиеттерін зерттеуді қажет етеді. Теміржол тасымалының жоғары қарқындылығына, жылжымалы құрамның осьтеріндегі үлкен жүктемелерге, пойыздардың өсіп келе жатқан жылдамдығы мен массасына байланысты тозуға төзімділік пен контактілі шаршауға төзімділікті арттыру мәселесі үлкен практикалық маңызға ие болатынын ескеру қажет [2, 3].

## Әдіснама

Химиялық құрамы 1-кестеде (ГОСТ 10791-2011) келтірілген 2-ші маркалы көміртекті болаттан жасалған тұтас илемделген доңғалақтары беттік плазмалық шынықтыруға ұшырады.

1-кесте. Болаттардағы химиялық қосылыстардың құрамы (%)

№	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu
1	0,570	0,780	0,350	0,027	0,030	0,17	0,12
2	0,630	0,820	0,420	0,025	0,036	0,19	0,15

Беріктендіретін термиялық өңдеуге ұшыраған доңғалақ жиектерінің механикалық қасиеттері (ГОСТ 1497 бойынша  $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ ) диаметрі 15 мм, есептік ұзындығы 60 мм үлгіде, соққы тұтқырлығы – ГОСТ 9454 бойынша 1 типті үлгілерде КСУ, 29430 Н жүктеме кезінде диаметрі 10 мм шармен ГОСТ 9012 бойынша қаттылық – НВ) 2 кестеде келтірілген.

2-кесте. Болаттың механикалық қасиеттері

№ п/п	$\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ. Дж/см <sup>2</sup>	20 мм тереңдіктегі НВ	жиектегі НВ
1	1017	15,0	32	0,34	258	267
2	1100	12,5	21	0,37	285	296

Доңғалақ жотасының жұмыс бетінен сырғанау бетіне өту аймағы плазмалық беріктендіруге ұшырады. Болат құрылымын нығайту шекарасының ені 25-26 мм жотаның жоғарғы жағынан 2-3 мм аралықта басталады. Бұл ретте плазмалық беріктендірудің режимі келесідей: тоқ күші 275 А, электр доғасының кернеуі 120 В, доға қуатының номиналды мәні 35 кВт, қорғаныс газының шығыны 5 л /мин, беріктендіру кезіндегі айналу жиілігі 0,143 айн/мин (доңғалақтың толық айналымы үшін 7,0 – 7,2 мин).

Макроскопиялық зерттеулер азот қышқылының 25% сулы ерітіндісімен өңдеуден кейін көлденең шаблонда жүргізілді. Микроскопиялық зерттеулер x200 үлкейту кезінде «Neophot» оптикалық микроскоптың көмегімен сегменттен көлденең бағытта кесілген микрошлифтерде беріктендірілген қабатты сақтау шартымен жүргізілді. Электронды микроскопиялық зерттеулер JeolJEM 2100 электронды микроскопында жүргізілді. Микроқұрылымды, беріктендіру тереңдігін, жотаның көлденең қимасы бойынша микроқаттылықтың таралуын, беріктендірілген беттердің сапасы зерттелді.

Шыңдалған қабаттың микроқаттылығын өлшеу ГОСТ 9450-2006 «Алмаз ұштарын бастыру арқылы микроқаттылықты өлшеу» талаптарына сәйкес 1,962 Н (200 гс) жүктеме кезінде ПМТ-3 қатты өлшегіште өңдеуге дейін микрошлифте жүргізілді.

Электронды-микроскопиялық зерттеуде репликаларды мұқият дайындауға ерекше назар аударылды. Бұл жағдайда ең маңызды сәт металлографиялық шлифтердің репликаларын металды электролиттік еріту арқылы бөлу болып табылады. Үлгіні еріту репликада сызаттар мен кесулерден басталады. Нәтижесінде көміртекті пленка жуылады және қабығы аршылады.

Электролиттік әдісті қолданған кезде, құймадан бөліну процесі үлгідегі газдардың бөлінуімен де бастамасын алады. Қатты газ шығарумен бірге жүретін пленканы бөлудің тым қарқынды процесі репликаның жыртылуына және бұзылуына әкелуі мүмкін, әсіресе өрескел рельефті тегістеу кезінде. Құйманы бөлу тәртібі үлгінің құрылымына байланысты. Осылайша, бір қорытпаның өрескел және ұсақ дисперсті құрылымдары құйманы бөлудің әртүрлі режимін қажет етеді. Қорытпа құрамының өзгеруі, сонымен қатар бөлу режимін өзгерту қажеттілігін тудырады. Осылайша, болаттың құрамындағы көміртегі мөлшерінің жоғарылауы қайталама цементит торының пайда болуымен байқалады, бұл цементит учаскелері оның жуылуын тоқтататындықтан, құйманың бөлінуінде асқынуға әкеледі. Үлгіні электролиттік еріту арқылы репликаны бөлу

кезінде болаттағы дисперсті карбидтердің өте көп саны пленка астында ерімеген карбид бөлшектерінің цементтелген қабатының пайда болуына ықпал етуі мүмкін, бұл пленканың қалыпты бөлінуіне жол бермейді [4, 5].

### Нәтижелер және талқылау

1-суретте жоғарыда көрсетілген режим бойынша беттік плазмалық қатайту кезінде пайда болған тұтас илектелген доңғалақты Болаттың градиент-қабатты құрылымы келтірілген.

Мартенсит →

Мартенсит+ троостит →

Троостит + сорбит →

Сорбит + перлит →

Перлит →

Бастапқы құрылым →



1-сурет. Беріктендірілген аймақта градиентті-қабатты құрылымы

3-кестеде плазмалық-термиялық әсер ету аймағына байланысты микроқаттылықтың өзгеруі (мкм) көрсетілген.

3-кесте. Қатайтылған қабаттың тереңдігі бойынша құрылым мен микроқаттылықтың өзгеруі

Беткейден қашықтық, мкм	Микроқаттылық, HV <sub>02</sub>	Микроқұрылым	Беткейден қашықтық, мкм	Микроқаттылық, HV <sub>02</sub>	Микроқұрылым
50	872	Пластиналы мартенсит	1100	425	Троостит
100	850		1200	460	
150	800		1400	403	
200	803		1500	380	
300	764		1600	323	Сорбит + перлит

400	585	Пластиналы мартенсит + троостит	1800	301	Перлит + феррит
500	580		1900	290	
600	550		2200	272	
700	546		2400	260	
800	536		2700	263	
950	500		2900	261	

Кесте 3 көріп отырғанымыздай, микроқаттылықтың өзгеруі  $872 HV_0 - 261 HV_{02}$  диапазонында болады. 0,05-0,30 мм тереңдікте микроқаттылығы 871-764  $HV_{02}$  мартенситті құрылым, 0,40-1,00 мм тереңдікте, 585-500  $HV_{02}$  микроқаттылығы бар троосто-мартенситтік құрылым байқалады. Содан кейін микроқаттылығы 500-403  $HV_{02}$  1,00-1,40 мм тереңдікте болаттың трооститті күйі 1,40-2,20 мм тереңдікте сорбиттік күйге 397-272  $HV_{02}$ , содан кейін негізгі металдың күйіне тән микроқаттылығы 260-263  $HV_{02}$  болатын феррит-перлит күйімен жалғасады.

Айта кету керек, жоғары жылдамдықты үздіксіз салқындату кезінде екі фазалы құрылымдардың (троостит, сорбит немесе перлит) түзілу процестерін ажырату мүмкін емес, өйткені салқындатылған өнімнің көлденең қимасы бойынша температураның өзгеру жылдамдығы тұрақты болып қалмайды. Шындығында трансформация процестері температура мен даму уақыты бойынша бірінің үстіне бірін қосады, бұл әдетте мартенсит + троостит, троостит + сорбит немесе сорбит + перлит түріндегі аралас құрылымдардың түзілуіне әкеледі. (1-сурет).

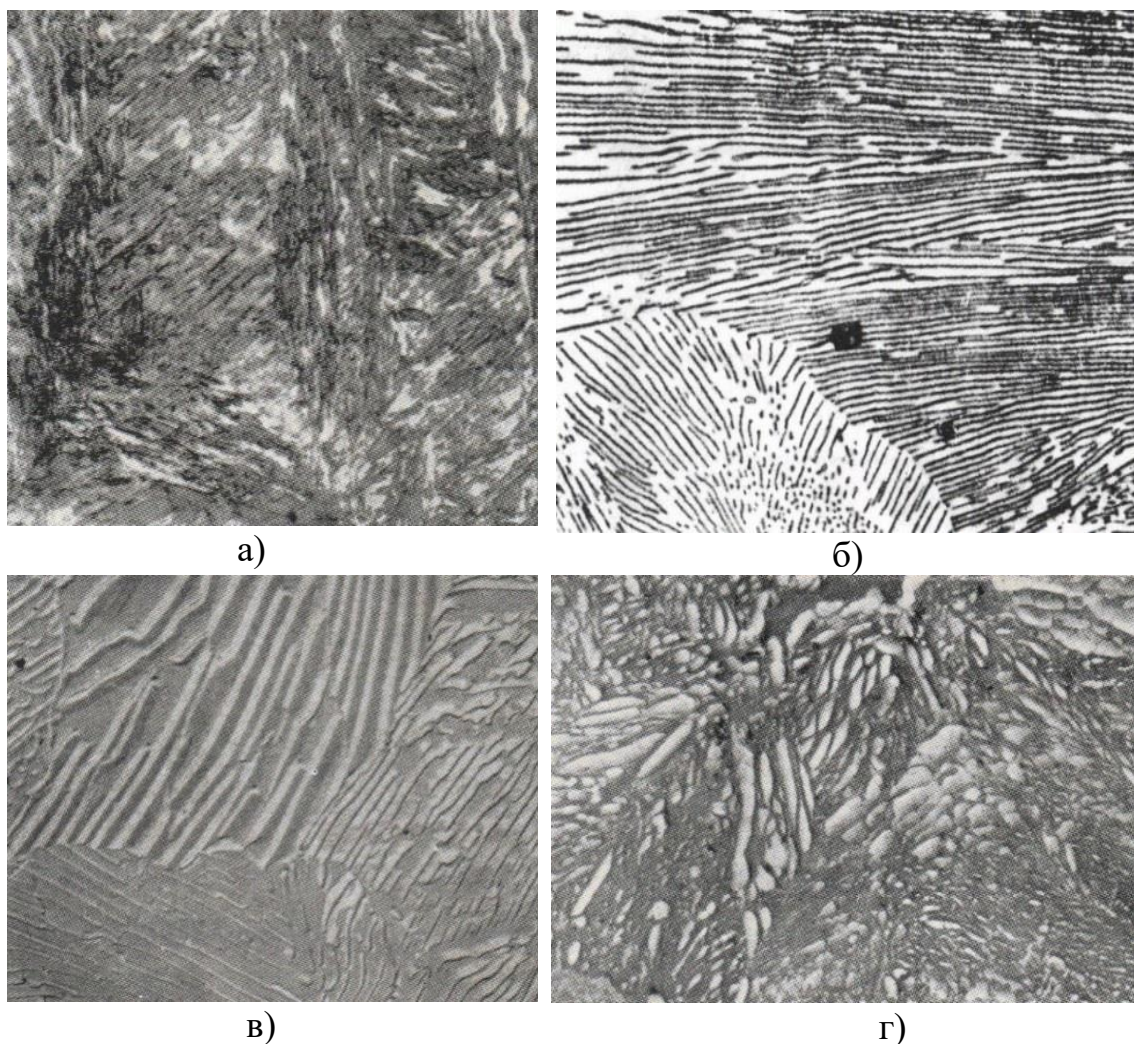
Берілген құрылымдардан және тәжірибелік мәліметтерден (1-сурет және 1-кесте) қатаю тереңдігінде әртүрлі микроқаттылықтағы бірнеше құрылымдық аймақтардың түзілуі анық байқалатыны анық. Металлдың жоғарғы қабаттарында өзінің химиялық құрамы бойынша көміртегінің мөлшері 0,57-0,63% болатын болатқа сәйкес келетін аймақ бар. Күрт салқындаған кезде ол 5-15 мкм дисперсиямен ине тәрізді мартенситке айналады. Одан кейін аустениттің троосто-мартенситке айналу тереңдігі ~0,6 мм болатын аймақ келеді. Бұл күйлердің микроқұрылымында жылу қабатының тереңдігіне байланысты аустениттің аздаған қалдық мөлшерінің болуы байқалады.

Одан кейін (~0,4 мм) троостит қабаты пайда болады, бұл қабатта микроқаттылық төмендейді және қалыптасқан фазалардың көлемдік құрамына байланысты болады; содан кейін құрылымда шамамен 0,8 мм тереңдікте сорбит пайда болады. Пайда болған сорбиттің орналасу аймағы бұрынғы аустенит түйірлерінің орталық аймақтарымен анықталады, олардағы феррит пен цементит компоненттерінің трооститпен салыстырғанда аз дисперсиясымен және микроқаттылығы төмен, бұл сонымен қатар құрамындағы фазалардың көптігіне байланысты.

Үлгінің тереңінде бұрынғы аустенит түйірлерінің шекараларының түйіскен жерінде перлит пайда болады және оның мөлшері біртіндеп арта түседі. Құрылым перлит-сорбитті болып қалады, содан кейін феррит-перлитке тегіс өтеді. Жалпы микроқаттылық бастапқы деңгейге дейін төмендейді. Бастапқы күй – бұл феррит пен перлит дәндерінің қоспасы, әр фазаның үлкен үлесі сәйкесінше 20-80% құрайды.



Сорбит пен трооститтің екі фазалы құрылымы тек электронды микроскопта анықталады, өйткені бұл құрылымдардың қабатаралық қашықтығы оптикалық микроскоптың рұқсат ету шегінде (~ 0,2 мкм) болады. 2-в және 2-с суреттерінде электронды микроскоптың көмегімен түсірілген x5000 үлкейту кезінде сорбит пен трооститтің фотосуреттері көрсетілген. Бұл құрылымдық аймақтардың екеуі де феррит пен цементиттің ауыспалы тақталарынан тұратыны анық көрінеді.



2-сурет. Үздіксіз салқындату кезінде аустениттің ыдырауының құрылымы (а – мартенсит, x1000); (б- перлит, x1000); (в – сорбит, x5000); (г- троостит, x5000);

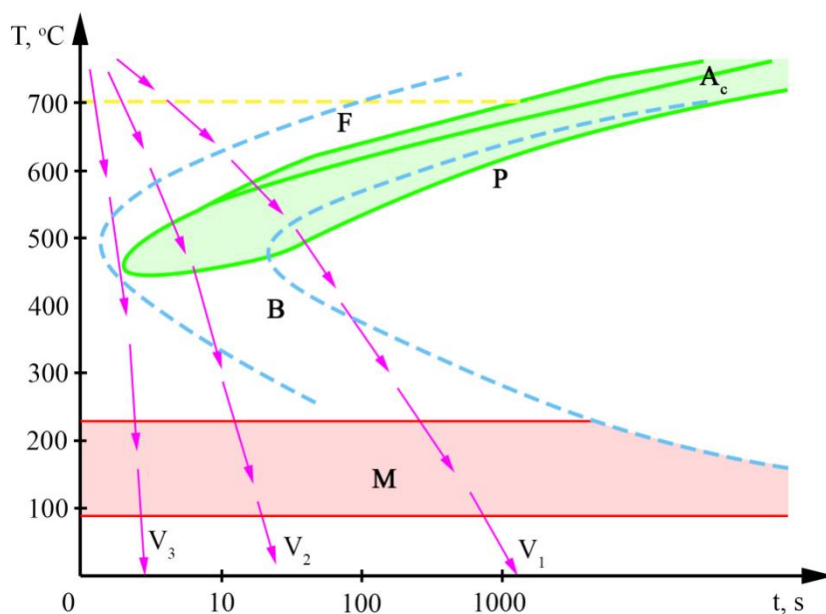
ГОСТ 10791-2011 бойынша 2-дәрежелі доңғалақ болатының аналогы болып табылатын гипозвтектоидты көміртекті болаттың (0,59-0,63% С) типтік термокинетикалық диаграммасы негізінде градиентті-қабатты құрылымның кинетикасы мен қалыптасу заңдылықтарын қарастырайық (сурет). 3). Тұтас сызықтар аустениттің үздіксіз салқындату кезінде ыдырауына (термокинетикалық), нүктелі сызықтар аустениттің тұрақты температурада (изотермиялық) ыдырауына сәйкес келеді [6].

Мартенситтік нүктесінен Mn (~2600C) жоғары температуралардағы термокинетикалық диаграмма тек бір кинетикалық максимуммен сипатталатынын көруге болады, бұл аустениттің ыдырауының аралық механизмінің жоқтығын білдіреді (диаграмманың көлеңкеленбеген бөлігі). Жоғарыда көрсетілген температураларда аустениттің ыдырауы диффузия арқылы жүреді және дисперсия дәрежесі әртүрлі феррит-карбид қоспасының түзілуімен бірге жүреді. Дисперсиялық дәрежесіне байланысты феррит-карбид қоспасы перлит, сорбит немесе троостит деп аталады, бұл қоспаның П, С және Т-ге бөлінуі шартты және бұл құрылымдар арасында нақты шекара жоқ екенін атап өткен жөн.

Сурет 3-те аустенитті V3 (критикалық қатаю жылдамдығы) және одан да жоғары жылдамдықпен салқындатқанда пластиналы мартенсит түзілетіні көрінеді. Төмен салқындату жылдамдығы V2 кезінде аса салқындатылған аустенит троосто-мартенситке айналады: түрлендіру ішінара перлит (диффузия), ішінара мартенситтік (диффузиясыз) механизммен жүреді. V1 одан да төмен салқындату жылдамдығында трансформация перлит пен сорбиттің екі фазалы құрылымдарының түзілуімен диффузиялық механизм бойынша дамиды [7].

Сонымен қатар, термокинетикалық диаграмма аустениттің бейниттік құрылымдардың пайда болуымен түрленуінің аралық механизмін жүзеге асыру мүмкін еместігін көрсетеді (жоғары салқындату жылдамдығына байланысты көміртек атомдарының қайта бөлінуі іске аспайды), сондықтан бұл жағдайда трансформация не перлиттік механизм бойынша (салқындату жылдамдығы V1, V2), не аралас перлит-мартенситпен (V2 және V3 арасындағы салқындату жылдамдығы) немесе мартенситтік механизм бойынша дамиды.

Перлиттің де, мартенситті де түрлендірулердің негізі аустениттің бет-центрленген кристалдық торының тепе-теңдіктің көлемді-центрленген торына немесе аса қаныққан ферритке ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) полиморфты ауысуы екенін байқауға болады.



2-сурет (0,60-0,65 % C) құрылымдық болаттардан аса суыған аустенитінің ыдырау диаграммасының схемасы [6]

2-суреттегі үзік сызықтар аустениттің изотермиялық түрленуіне, тұтас сызықтар үздіксіз салқындату кезіндегі түрленуге сәйкес келеді (термокинетикалық диаграмма). Изотермиялық жағдайда және тұрақты салқындату процесінде аустениттің түрлену кинетикасының бір мезгілде көршілес болуы термокинетикалық диаграммалардағы сызықтар изотермиялық диаграмманың оң және төменгі жағында орналасқанын көрсетеді. Бұл салқындатылған аустениттің тұрақты салқындатудағы тұрақтылығының әлдеқайда жоғары екенін және түрлену асқын салқындатылған аустениттің изотермиялық ыдырау жағдайына қарағанда төмен температурада жүретінін көрсетеді.

Бұл процесс тәжірибеде конструкциялық болаттардың маңызды құрылымдық сипаттамасы болып табылатын пластина аралық қашықтықта көрінеді. Пластиналар арасындағы қашықтық перлиттік құрылымдардағы іргелес феррит пен цементит плиталарының қалыңдығының орташа қосындысы болып табылады. Осылайша, салқындату жылдамдығы неғұрлым жоғары болса, соғұрлым пластина аралық қашықтық азырақ және алынған феррит-карбид қоспасы неғұрлым дисперсті болса, соғұрлым болаттың микроқаттылығы (қаттылығы) жоғары болады [8, 9].

Атап өткендей, құрылымдық қайта түрленулерді талдау кезінде феррит-цементиттік құрылымдардың перлитке, сорбитке немесе трооститке бөлінуі шартты және әдетте, бұл құрылымдар арасында нақты шекара жоқ екенін есте ұстаған жөн. Өйткені, іс жүзінде таза троостит, сорбит немесе перлиттің пайда болу процестерін ажырату мүмкін емес, тұрақты салқындату процесінде салқындатылған өнімнің көлденең қимасы бойынша температураның өзгеру жылдамдығына байланысты ол өзгермелі және сыналатын болаттың термофизикалық қасиеттеріне байланысты белгілі бір заң бойынша өзгереді. Сондай-ақ, перлиттен айырмашылығы, сорбит және троостит тепе-теңдік компоненттері емес. Қолданыстағы өндіріс жағдайында салқындату, әдетте, тепе-теңдік емес және бұл сорбит пен троостит ферритінің көміртегімен белгілі бір асқын қанығуына әкеледі, бұл кейіннен механикалық қасиеттерге әсер етуі мүмкін. Атап айтқанда, перлит, сорбит немесе троостит құрылымдары бар болаттың механикалық қасиеттері феррит пен цементит арасындағы бөлу бетінің ауданына тура пропорционалды. Сондықтан аустениттің ыдырау температурасының төмендеуімен және құрылымның тиісінше ұсақталуымен (дисперсиялылық дәрежесінің күшеюі) ферриттік пластинкалар көміртегімен біршама шамадан тыс қанығады, беріктік сипаттамалары (беріктігі –  $\sigma$  қаттылығы – НВ) артады, ал пластикалық сипаттамалары (салыстырмалы ұзаруы –  $\delta$  және тарылуы –  $\psi$ ) азаяды [10, 11].

1-суретте келтірілген микроқұрылымдар перлиттіге мартенситтік түзілімнің салынғанын көрсетеді. Осылайша, 5500С-4600С ~ температуралық аралықта V2 салқындату жылдамдығы кезінде аустениттің бір бөлігі диффузиялық механизммен трооститке айналады, қалған бөлігі Mn (~ 2600С) нүктесінен төмен диффузиясыз мартенситке өтеді. Келтірілген және басқа да осыған ұқсас мысалдар әртүрлі жылдамдықпен салқындату кезінде құрылымдардың түзілуін эксперименталды зерттеу қарапайым міндет емес екенін көрсетеді, өйткені ол бірнеше факторларға байланысты: ең алдымен салқындату жылдамдығына, кинетикаға және дамудың температуралық шарттарына. белгілі бір түрлендіру кезінде олар белгілі бір шектерде өзгеруі мүмкін. Түрлену тек бір механизм



арқылы жүзеге асатын температура шекараларын болжау және троостит, сорбит немесе перлиттің құрылымдық аймақтарын нақты шектеу әрқашан мүмкін емес. Шындығында түрлену процестері температура мен даму уақыты бойынша бір-бірімен қабаттасуы мүмкін, бұл аралас пластина тәрізді құрылымдардың пайда болуына әкеледі [12, 13].

### **Қорытынды**

1. Плазмалық беріктендірілген болаттың беткі аймағында жоғары жылдамдықты қыздыру және салқындату кезінде беріктендірілген аймақтың қимасында аустениттің ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) түрленуінің әртүрлі механизмдерімен анықталған градиентті қабатты құрылым пайда болатындығы көрсетілген. Сонымен қатар, қажетті механикалық қасиеттер кешенін (беріктік, қаттылық, икемділік және қаттылық) қамтамасыз ету тұрғысынан металдың оңтайлы құрылымы жоғары дисперсті мартенсит, троосто-мартенсит және сорбит ұсынылған біртекті емес аралас құрылым болып табылады.

2. Термокинетикалық диаграммаға негізделген микроқұрылымды талдау және термиялық аймақтың көлденең қимасы бойынша микроқаттылықтың пайда болуы болатты доңғалақты беттіктермиялық беріктендіру кезінде мартенситті және перлиттік түзіліс градиентті-қабатты құрылымның пайда болуымен жүретінін көрсетеді. Беткі аймақта диффузиясыз мартенсит түзілімі дамып, ине тәріздес мартенситтің пайда болуына әкеледі. Төменгі қабаттарда аустениттің ыдырауы диффузия арқылы жүреді және дисперсия дәрежесі әртүрлі пластиналы феррит-карбид қоспасының пайда болуымен бірге жүреді.

3. Салқындату жылдамдығы неғұрлым жоғары болса, алынған ферритті-карбид қоспасы дисперсті болады, пластиналар арасындағы қашықтық соғұрлым аз болады. Сондықтан құрылымның дисперсия дәрежесінің жоғарылауымен беріктік сипаттамалары (беріктігі -  $\sigma_b$  қаттылық -  $HV$ ) артады, ал пластикалық сипаттамалар (салыстырмалы ұзару -  $\delta$  және тарылу- $\psi$ ) төмендейді.

4. Плазмалық беріктендірілген болатты доңғалақтың беткі қабатында градиентті қабатты құрылымның қалыптасуы мартенсит құрылымдарынан троосто-мартенсит және аралас пластиналық құрылымдарға (троостит, сорбит) күртауысудың шекарасының пайда болуын болдырмауға мүмкіндік беретіні атап өтілді, бұл болатты доңғалақтың жанасу-шаршау беріктігін арттыратын және оның жарыққа төзімділігіне ықпал ететін маңызды факторлардың бірі болып табылады.

**Алғыс.** Мақаланың материалдары Л.Н. Гумилеватындағы ЕҰУ техникағылымдарының докторы, «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының профессоры А.Т. Қанаевпен бірлесіп дайындалды.

### **Авторлардың қосқан үлесі.**

**А.Т. Қанаев** осы мақаланың мәтінін жазуда елеулі зияткерлік үлесін қосқан.

**Т.Е. Сарсембаева**, деректер жинады, оларды талдаумен және жұмыс нәтижелерін түсіндірумен айналысты. Сондай-ақ, автордың қосқан үлесі мақаланың мазмұнын, оның

дизайнын қайта қарау және мақаланың соңғы нұсқасын жариялау үшін бірлесіп бекіту болып табылады.

### Әдебиеттер тізімі

1. Коваленко В.В., Козлова Э.В. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах. Новокузнецк: ООО «Полиграфист». – 2009. - 557 с.
2. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / перевод с англ. У. Харрис, С. Захаров, Д. Ландгрен и др. - М.: Интекст. - 2002. - 416 с.
3. IX Всемирный конгресс по скоростному железнодорожному движению, Токио, 2015 // Железнодорожный транспорт. - 2016. - № 4. Высокоскоростное движение – будущее железнодорожного транспорта (urfu.ru)
4. Рюле М., Уилкенс М. Просвечивающая электронная микроскопия// «Физическое металловедение», том 1, Перев. с английского под редакцией Абрамова О.В. и Копецкого Ч.В. – М.: Металлургия. – 1997. - 640 с.
5. Спенс Дж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения. Пер. с английского. – М.: Наука. - 1996. - 320 с.
6. Металлография железа. Т. 1 «Основы металлографии», перев. с англ. Изд-во «Металлургия». - М.: - 1972. - 240 с.
7. А.Т. Канаев, Т.Е. Sarsembaeva, М.А. Saidullaeva. Formation of Gradient-Foliated Structures under High-Temperature Thermomechanical Treatment and Surface Plasma Quenching of Carbon Steel. ISSN 0967-0912, Steel in Translation, 2021, Vol. 51, No. 9, pp. 677–682. © Allerton Press, Inc., 2021. Russian Text © The Author(s), 2021, published in Stal'. – 2021. No. 9. pp. 51–55.
8. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия. – 1984. - 360 с.
9. Тушинский Л.И. Структурная теория конструктивной прочности материалов. - Новосибирск, Изд-во НГТУ. - 2004. - 400 с.
10. Исакаев Э.Х., Ильичев М.В., Тюфтев А.С. Особенности структурообразования и формирования свойств при плазменной обработке углеродистой стали // Сталь. – 2003. № 2. С. 52-55.
11. Савицкий А.И., Бахрах С.Б., Завизиан Н.Ф. Влияние плазменной обработки на структуру и механические свойства поверхностного слоя металлов // Сварочное производство. – 1993. № 11. с. 10-11.
12. Польшин А.Н., Болотина Н.П., Боль А.А. и др. Новые материалы и технологии, Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных условиях. - Новосибирск, Наука, Сибирская издательская фирма. - 1992. - 200 с.
13. А. Канаев, D. Orynbekov. Gradient layer structure formation During plasma treatment of wheel steel. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD). ISSN (P) 2449-6890; ISSN (E) 2249-8001; Vol 10, Issue 3, Jun 2020. pp. 457-466.

Т.Е.Сарсембаева\*<sup>1</sup>, А.Т.Канаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НАО «Казакский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина»,  
Астана, Казакстан

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казакстан

### Формирование градиентно-слоистой структуры в конструкционной стали при плазменной закалке

**Аннотация.** Исследованы структурные особенности конструкционной стали в процессе поверхностного плазменного упрочнения. Показано, что при скоростном нагреве и охлаждении в поверхностной зоне формируется градиентно-слоистая структура, определяемая различными механизмами превращения аустенита ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) в сечении закаленной зоны. Установлено, что в поверхностной зоне развивается бездиффузионное мартенситное превращение, которое приводит к образованию игольчатого мартенсита. В нижних слоях распад аустенита сопровождается процессом диффузии и в дальнейшем образовании пластинчатой феррито-карбидной смеси разной степени дисперсности. Показано, чем больше скорость охлаждения, тем дисперснее получающаяся феррито-карбидная смесь, тем меньше величина межпластиночного расстояния. Это ведет к тому, что с увеличением степени дисперсности прочностные характеристики (прочность – σв твердость – НВ) возрастают, а пластические характеристики (относительное удлинение – δ и сужение – ψ) уменьшаются.

Отмечено, что формирование в поверхностном слое стали градиентно-слоистой структуры позволяет исключить образование резкой границы перехода от структур мартенсита к троостомартенситным и смешанным пластинчатым структурам (троостит, сорбит), являющегося одним из важных факторов, с помощью которого можно повысить контактно-усталостную прочность стали и в дальнейшем будет способствовать ее трещиностойкости.

**Ключевые слова:** колесная сталь, плазменная закалка, структурообразование, механизмы превращения, неоднородные структуры, дисперсность структур, механические свойства.

Т.Е.Сарсембаева\*<sup>1</sup>, А.Т.Канаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Eurasian national university, Astana, Kazakhstan

### Formation of a gradient-layer structure in structural steel during plasma hardening

**Abstract.** The structural features of structural steel in the process of surface plasma hardening have been studied. It is shown that during rapid heating and cooling in the surface zone, a gradient-layered structure is formed, determined by various mechanisms of austenite transformation ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) in the section of the hardened zone. It has been established that a diffusion-free martensitic transformation develops in the surface zone, which leads to the formation of acicular martensite. In the lower layers, the decomposition of austenite is accompanied by the process of diffusion and the further formation of a lamellar ferrite-carbide mixture of varying degrees of dispersion. It is shown that the higher the cooling rate, the more disperse

the resulting ferrite-carbide mixture, the smaller the interplate distance. This leads to the fact that with an increase in the degree of dispersion, the strength characteristics (strength –  $\sigma$  in hardness – HB) increase, and the plastic characteristics (relative elongation –  $\delta$  and contraction –  $\psi$ ) decrease.

It is noted that the formation of a gradient-layered structure in the surface layer of steel makes it possible to eliminate the formation of a sharp transition boundary from martensite structures to troostemartensitic and mixed lamellar structures (troostite, sorbite), which is one of the important factors by which contact fatigue strength can be increased steel will continue to contribute to its crack resistance.

**Keywords:** wheel steel, plasma hardening, structure formation, transformation mechanisms, heterogeneous structures, dispersion of structures, mechanical properties.

### References

1. Kovalenko V.V., Kozlova E.V. Physical nature of the formation and evolution of gradient structural-phase states in steels and alloys. Novokuznetsk: Polygraphist LLC. – 2009. - 557 p.
2. Generalization of best practices in heavy lift traffic: issues of interaction between wheel and rail / translation from English. W. Harris, S. Zakharov, D. Landgren and others - M.: Intext. - 2002. - 416 p.
3. IX World Congress on High-Speed Rail Traffic, Tokyo, 2015 // Railway transport. - 2016. - No. 4. *Высокоскоростное движение – будущее железнодорожного транспорта (urfu.ru)*
4. Rühle M., Wilkens M. Transmission electron microscopy. In the book “Physical metallurgy”, volume 1, Transl. from English, edited by O.V. Abramov. and Kopetsky C.V. – M.: Metallurgy. - 1997. - 640 p.
5. Spence J. Experimental high-resolution electron microscopy. Per. from English. – M.: Nauka. - 1996. - 320 p.
6. Metallography of iron. Vol. 1 “Fundamentals of Metallography”, trans. from English Publishing house "Metallurgy". - M.: - 1972. - 240 p.
7. A.T. Kanaev, T.E. Sarsembaeva, M.A. Saidullaeva. Formation of Gradient-Foliated Structures under High-Temperature Thermomechanical Treatment and Surface Plasma Quenching of Carbon Steel. ISSN 0967-0912, Steel in Translation, 2021, Vol. 51, No. 9, pp. 677–682. © Allerton Press, Inc., 2021. Russian Text © The Author(s), 2021, published in *Stal*, 2021, No. 9, pp. 51–55.
8. Lakhtin Yu.M. Metallurgy and heat treatment of metals. – M.: Metallurgy. -1984. - 360 p.
9. Tushinsky L.I. Structural theory of structural strength of materials. - Novosibirsk, NSTU Publishing House. - 2004. - 400 p.
10. Isakaev E.Kh., Ilyichev M.V., Tyuftev A.S. Features of structure formation and formation of properties during plasma processing of carbon steel // *Steel*. – 2003. No. 2. p. 52-55.
11. Savitsky A.I., Bakhrakh S.B., Zavizian N.F. The influence of plasma treatment on the structure and mechanical properties of the surface layer of metals // *Welding production*.- 1993. No. 11, p. 10-11.
12. Polyryn A.N., Bolotina N.P., Bol A.A. and others. New materials and technologies, Theory and practice of strengthening materials under extreme conditions. - Novosibirsk, Science, Siberian Publishing Company. - 1992. - 200 p.
13. A. Kanaev, D. Orynbekov. Gradient layer structure formation During plasma treatment of wheel steel. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*. ISSN (P) 2449-6890; ISSN (E) 2249-8001; Vol 10, Issue 3, Jun 2020. P. 457-466.

Авторлар туралы мәлімет:

**Сарсембаева Т.Е.** – PhD докторы, аға оқытушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Жеңіс даңғылы, 62 Астана, Қазақстан

**Канаев А.Т.** – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сатпаев көшесі 2, Астана, Қазақстан

**Сарсембаева Т.Е.** – доктор PhD, старший преподаватель Казахский агротехнический исследова-тельский университет имени С. Сейфуллина, проспект Женис, 62, Астана, Казахстан

**Канаев А.Т.** – доктор технических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, улица Сатпаева 2, Астана, Казахстан

**Sarsembaeva T.E.** – PhD, senior lecturer S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62 Zhenis Avenue, Astana, Kazakhstan

**Kanaev A.T.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Eurasian National University, 2 Satpaev street, Astana, Kazakhstan



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/>).