

БОЛАТТАРДЫ ТЕРМОМЕХАНИКАЛЫҚ ӨНДЕУ ПРОЦЕСІНЕ ШОЛУ

Кәкімов Ұ.Қ., Алтынбек Р.К.

Аннотация:

Қазіргі заманда мұнай мен газды тұтыну және тасымалдау деңгейінің күрт өсуі, металдарды өңдеудің алдыңғы қатарлы технологиясы – термомеханикалық өңдеу технологиясының дамуына әкеліп соқтырды. Мұнай мен газды тасымалдауға арналған үлкен диаметрлі құбырлар өте қиын жағдайда, яғни төмен температурада және жоғары қысымда жұмыс істейді. Қазіргі таңда өңдеу процесін басқару арқылы болат табақтарының соңғы талап қойылған қасиеттеріне қол жеткізу мүмкіншілігі туды. Сондықтан, соңғы микроқұрылымды басқару үшін бірнеше кезеңдерден өту қажет: қайта қыздыру, ыстықтай илемдеу және соңғы трансформация. Бұл жағдайда «басқару» термині термомеханикалық өңдеудің (ТМӨ) дамуына әкелетін аустенит дәндерін ұсақтау ретінде танылады. Осы мақаланың мақсаты – термомеханикалық өңдеу процесінің дамуына шолу.

Кілттік сөздер: термомеханикалық өңдеу, микроқұрылым, болат, илемдеу, жылу, деформация, трансформация.

Аз легіріленген аса берік болаттарда (HSLA steels) микролегірілеуші элементтері (V, Nb, Ti) бар. Олар дәндердің өсуін тоқтата алады және аустениттің рекристаллизациясын

бәсеңдетеді. Осындай болаттардың бірнеше қасиеттері бар: беріктік, қаттылық, созымдылық және пісіруге қабілеттілік [1-6]. Сондықтын, қасиеттердің жетілдіруі ТМӨ мен легірілеуші элементтердің комбинациясы түрткі болды. Морт сынғыштыққа қарсыласу өте маңызды қасиеттерінің бірі болып табылады. Мұнда ферритті-перлитті болаттарда осы қасиет

ферриттің соңғы дән өлшемімен басқарылады. Алайда толықтай ине тәріздес немесе бейнитті болаттарда бұл аустенит дәнінің өлшемімен басқарылады [6-11].

Көптеген ғылыми мақалаларда көрсетілгендей [6-11], басқарылатын илемдеу (БИ) көбінде қарқынды суытумен (ҚС) жүреді. Сондықтан, бұл процесстердің араласқан әдістері термотехникалық басқарылатын өңдеудің (ТМБӨ) дамуына әкелді. «Қарқынды суыту» термині ыстық металды тез суыту (суыту жылдамдығы $\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{c}$) ретінде қарастырады. Ол ферриттің қайта

құрылуына байланысты 500°С – 750°С температура аралығында жүреді. Мұнда суыту 550°С – 600°С дейін сумен суыту, одан кейін ауамен суыту ақылы жүзеге асады. Қарқынды суыту басқарылатын илемдеуден кейін болады және де кейінгі микроқұрылымның ұсақталуына әсерін тигізеді [5, 7-10]. Тәжірибе жүзінде ҚС табақтардың қалыңдық диапазонында қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді.

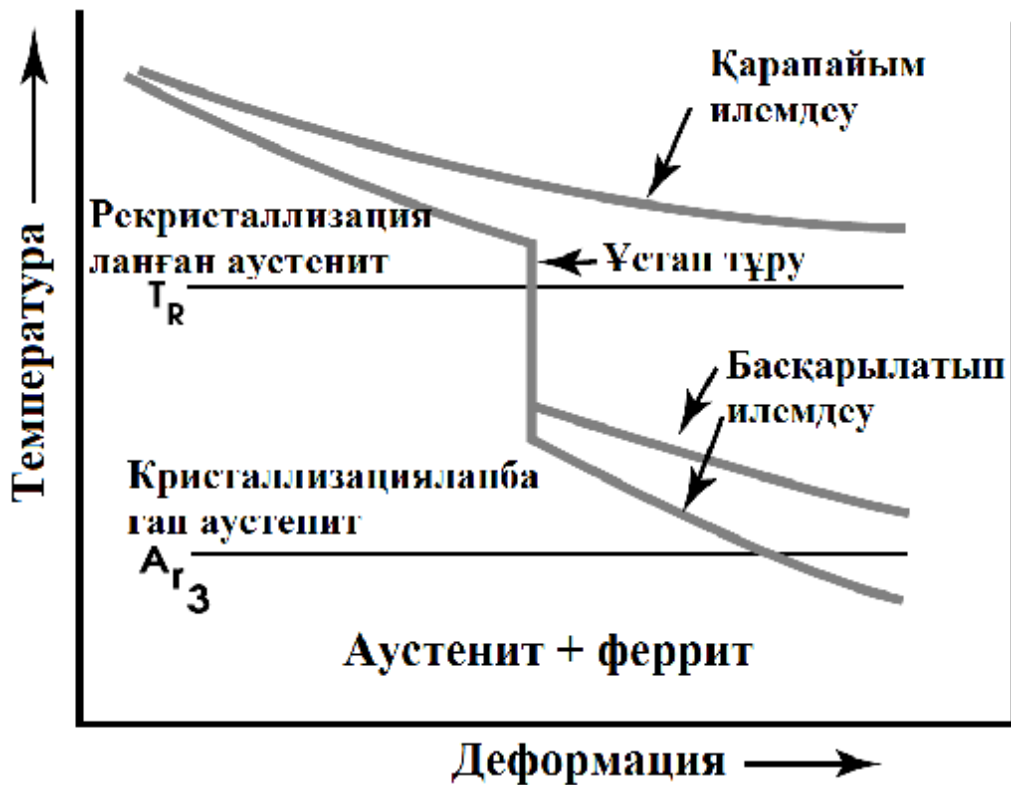
БИ табақтың беріктігін, сонымен қатар соққыға қарсыласуын жақсартады. Бұл процесс микро легірленген көміртекті болаттар үшін жасалған.

Негізінен ТМӨ–дің 3 негізгі өңдеу кезеңі бар: қыздыру, ыстықтай илемдеу және суыту. ТМӨ – дің қарапайым ыстықтай илемдеуден (ҚБИ) айтарлықтай айырмашылығы әртүрлі қайта қыздыру температураларында, бастапқы және соңғы илемдеуде. Мұнда соңғы параметрлер ТМӨ – ден әлде қайда жоғары. Сонымен қатар, ТМӨ суу процедурасы өзінің жылдам илемдеу біткеннен

кейін ҚБИ салыстырғанда суу жылдамдығымен ерекшеленеді.

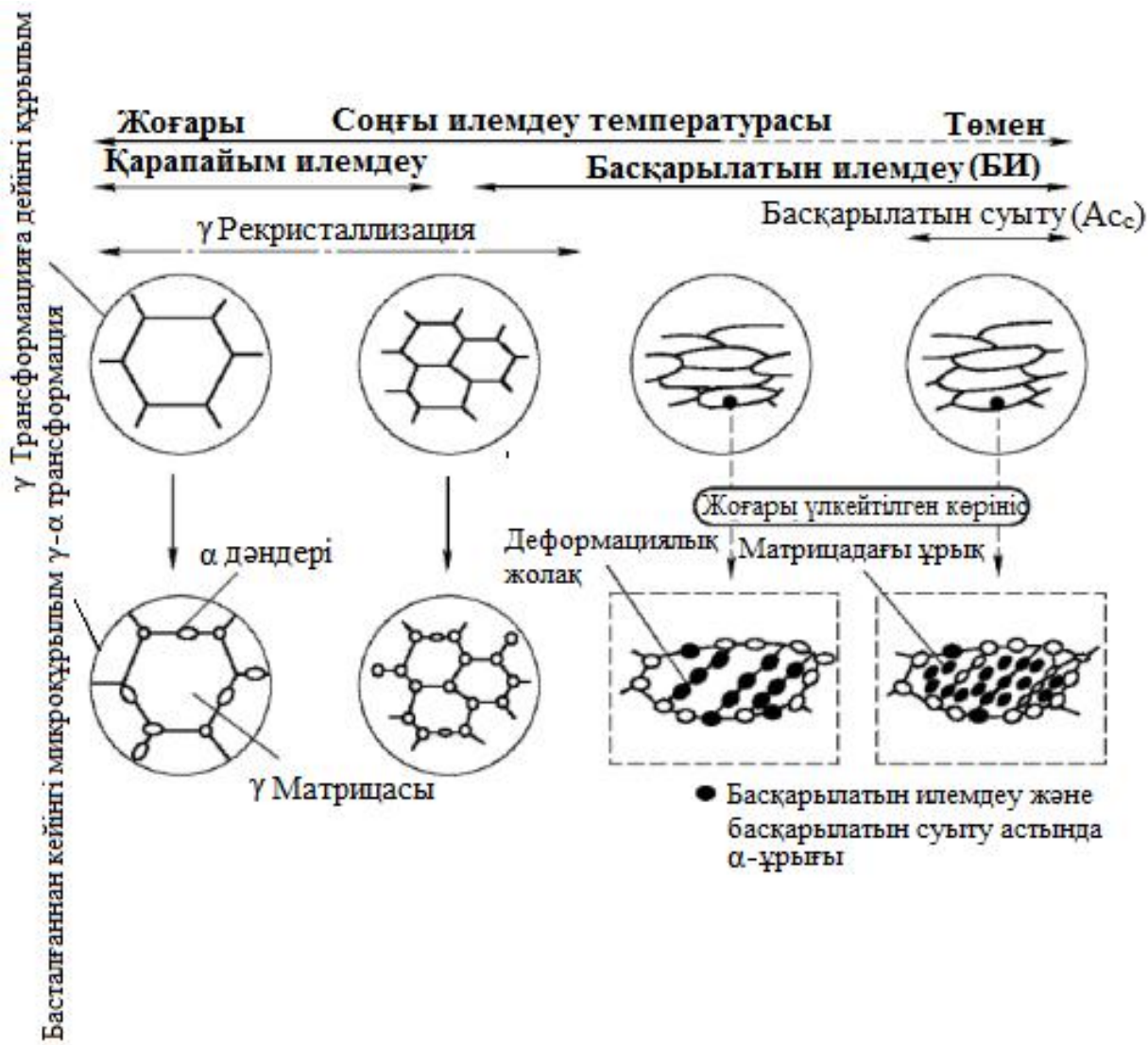
Басқарылатын илемдеу пайда болғаннан кейін, негізгі мақсат илемдеу кезінде микроқұрылымның дамуын басқаруға көзделген. Бұл жайт аустениттің кристаллизацияланбаған аумағында қол жеткен болатын. Осындай нәтиже ұсақ ферритті дәндердің пайда болуына әкелді. Кейінгі басқарылатын илемдеу дамуы басқа БИ түрін дамытты. Ол рекристаллизациялық басқарылатын илемдеу (РБИ). Ол процесстің негізгі түйіні бастапқы және соңғы илемдеу аустенит рекристаллизацияланатын температурасынан жоғары болған жағдайда жұмыс істейді. Сондықтан, ұсақ феррит дәндері ұсақ аустенит дәндерінің трансформациясы арқасында пайда болады.

ҚБИ мен БИ тәсілдері арасындағы айырмашылық көрсетілген (сурет-1). Көрнеті түрде ҚБИ жұмысшы температуралары БИ –ден әлде қайда жоғары болатынын аңғаруға болады.



Сурет 1 – Қарапайым және басқарылатын илемдеу арасындағы айырмашылықтың сұлбасы [12].

Қарапайым және басқарылатын илемдеу кезінде аустенит пен ферриттің микроқұрылымдық дамуы көрсетілген (сурет-2). Мұнда басқарылатын илемдеу мен басқарылатын суыту комбинациясы термомеханикалық басқарылатын илемдеу процесінің (ТМБП) дамуына әкелді.



Сурет 2 - Қарапайым және басқарылатын илемдеу кезінде аустенит пен ферриттің микроқұрылымдық дамуы [4].

Екі негізгі басқарылатын илемдеу түрлерін анықтау алдында ТМӨ салдарынан микроқұрылым дамуының негізгі өзегі анықталуы қажет. Металдың бірнеше өту деформациясына берік болу және жұмсару процесстері әсерін тигізеді. Мұнда екі процесс бір мезетте пайда болады. Осы процесстерге бес суб-процесстер жатады: берік

болу, динамикалық қалпына келу, динамикалық рекристаллизация, статикалық қалпына келу және статикалық рекристаллизация.

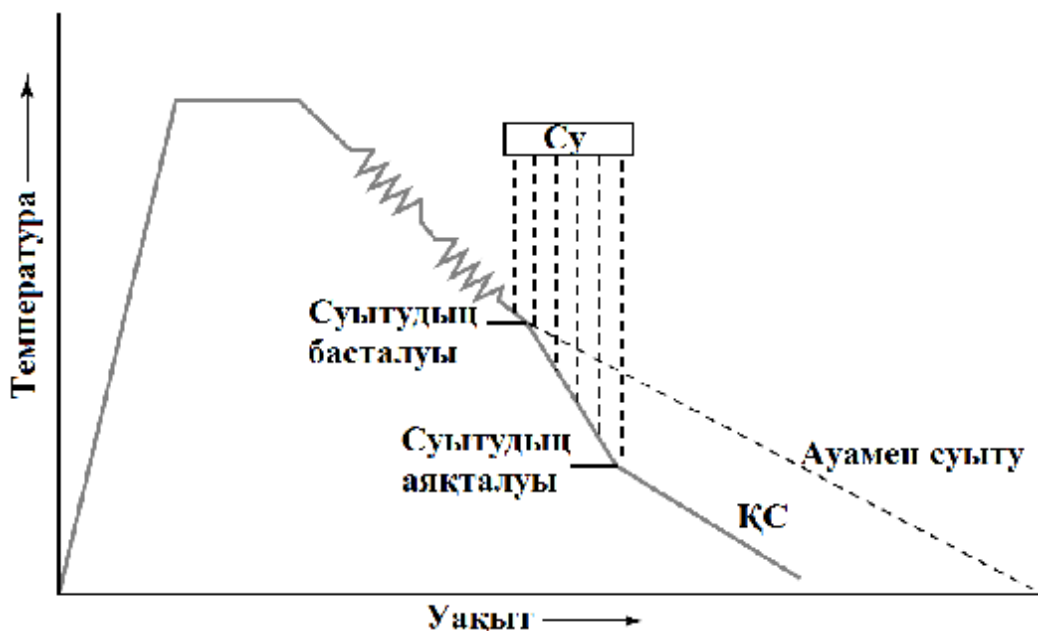
Әдетте аз легірленген аса берік болаттарды өндіру оларды аустениттік аймаққа дейін қыздырудан бастайды. Сосын бастапқы өңдеу барысында әр илемдеуден кейін берік болу

толықтай жұмсарумен қатар жүреді. Ол қалпына келу немесе рекристаллизация арқасында болады. Сондықтан, берік болу деформацияның төменгі температураларында өзінің айқын әсерін тигізеді.

Термомеханикалық өңдеу соңғы илемдеуден кейін суытуды талап етеді. Оның тәжірибелік маңызы талап ететін микроқұрылымға қол жету. Енді деформацияланған металды суытудың бірнеше жолдары бар: сумен және ауамен суыту. Бірақ, қарқынды суыту ТМӨ негізгі құралы болып табылады. Осының арқасында дәндердің ұсақталуын және өнімділігін жақсартады. Осы

процесс басқарылатын суыту циклы болып табылады. Яғни, $750^{\circ}\text{C} - 850^{\circ}\text{C}$ температуралық аралықта соңғы деформациядан кейін дереу сумен суытып, содан соң ауамен суыту болады (сурет-3).

Қарқынды суытудың негізгі артықшылығы сууға байланысты трансформация температурасының төмендеуінен ұсақ ине тәріздес ферритті құрылу мүмкіндігінде жатыр. Осының салдарынан осындай жағдай кристаллизация ошақтарының пайда болу жылдамдығын ұлғайтады, ал осы ошақтардың өсуін бәсеңдетеді.



Сурет 3 – Қарқынды суытудың сұлбасы

Бірнеше ғалымдардың зерттеулері бойынша аз легірленген аса берік болаттарда суыту жылдамдығын ұлғайтқан кезде феррит дәндері айтарлықтай ұсақталады. Ол трансформация температурасын төмендетеді. Одан басқа, қарқынды суыту тұнбаларды (мысалы V, Nb, Ti [C, N]) ұсақтай алады. Бұл жайт аз легірленген аса берік болаттардың механикалық қасиеттерін жақсартады.

HSLA болаттарды өңдеу кезінде механикалық қасиеттеріне әсер ететін бірнеше легірлеуші элементтер бар. Көміртегі белгілі болаттарға негізгі компонент болып табылады. Жақсартылған пісіру қасиеттеріне жету салдарынан көміртегінің мөлшері салыстырмалы түрде аз болады (0.1-0.2% C). HSLA болаттарында легірлеуші элементтердің екі түрін ажыратады: 1) Беріктеуші қатты ерітінділер (*Mn, Ni, Cr* және т.б. – ауыстыру атомдары; *C* және *N* – ену атомдары), 2) карбид-нитрид құраушылар (*V, Ti, Nb* және *B*). Болаттағы басқа элементтер зиянды қоспалар ретінде есептеледі (*S, P, Ca*).

Марганец HSLA болаттардың шынығуға қабілеттілігі мен беріктігін жақсартады. Ол критикалық суу жылдамдығын төмендетуге мүмкіндік туғызады. Марганецтің салыстырмалы жоғары мөлшері аустенит-феррит

трансформациялық температурасын бәсеңдетеді және де ол ұсақ дәндердің қалыптасуына әкеледі [14].

Никель HSLA болаттардың төменгі температураларда жақсартылған беріктігіне әсер тигізеді. Ол критикалық температураны төмендетеді және тиімді шынықтыру мен босату үшін температуралық интервалды ұлғайтуға мүмкіндік береді. Одан басқа ол аустенит ыдырауын тоқтатады және карбидтердің қалыптасуына сезімтал болмайды. Себебі аустенит рекристаллизациясына дейін қыздырылады [15].

Хром болатта негізгі компоненттердің бірі, шынығу қабілеттілігін және абразивті тозуға қарсылығын жақсартады. Ол жоғары температураларда тұрақты карбидтерді қалыптастыра алады. Ол болаттар үшін тиімді, себебі жоғары температураларда қолдануына байланысты болады.

Алюминий легірлеуші элемент ретінде дәндердің ұсақталуы үшін көп қолданылады. Нәтижесінде ол материалдың беріктік шегін ұлғайтады және өтпелі температура әсерін (ИТТ) төмендетеді.

Бірақ HSLA болаттарда ванадий, ниобий, титан және бор сияқты микролегірлеуші

элементтерге аса қызығушылық танытады [16]. Олардың осы болаттарда толықтай мөлшері 0.1% аспайды. Олардың көбісі карбидтер мен нитридтерді құрайды, ол дәндердің ұлғаюын тоқтатады. Бұл элементтер ТМӨ кезінде критикалық температураға әсерін тигізеді (T_{GC} – дәндердің ұлғаю температурасы, T_{RXN} – рекристаллизация температурасы, және трансформация температурасы). Микролегіруші элементтерді қосудың келесі себебі қысу күштерін туғызу арқылы дән өлшемінің өсуінен қорғау. Нәтижесінде дән ұлғаюын тоқтату арқылы дән ұсақтығының беріктігіне әкеледі. Сондықтан жоғары беріктікті табақтарға тұтқырлық өте маңызды қасиет, ал жоғары беріктікті тілкемдерге беріктік тұтқырлыққа қарағанда маңыздырақ болып табылады.

Ванадий HSLA болаттарында беріктеуші микролегіруші элемент ретінде қарастырылады. Мысалы мойынтіректерде қолданылмайтын болаттарда беріктік ескіруден және феррит дәндерінің ұсақталуынан жоғарылайды. Ванадийдің нитридтері мен карбидтері феррит дәндерінің шектеріне тұнады және аса беріктіктің пайда болуына әкеледі.

Ниобий рекристаллизацияны тоқтататын ультра ұсақ деформацияның салдарынан

пайда болған тұнбаларды құрады. Бірақ ниобий карбиді мен нитридін бөлшектері жоғары температураларда ериді, олар жоғары температураларда дәндердің өсуінен қорғай алмайды. Сондықтан олар өңдеудің соңғы кезеңдерінде аса маңызды болады.

Титан нитридтары жоғары температураларда өзінің тұрақтылығын көрсетеді және өңдеудің бастапқы кезеңдері мен қайта қыздыру кезінде дәндердің өсуін тоқтата алатын пайдалы инструмен ретінде қолданылады. Бірақ, титан карбиді жоғары температураларда ери алады, ал төменгі температураларда онда салыстырмалы жоғары аса қанығатын болады. Сондықтан ол рекристаллизацияны айтарлықтай бәсеңдететін деформациядан шыққан бөлшектерді құрады.

Бор HSLA болаттарына аз мөлшерде (0.0005% *B*) оны қосу арқылы беріктікке қабілеттілігін жоғарылатады. Бұл жағдайда, көміртегі мөлшері бор мөлшеріне қарағанда мүмкіндігінше төменірек болу керек. Микролегіруші элемент ретінде бордың келесі ерекшелігі ол феррит беріктігіне әсер етпейді. Сондықтан жақсы өңдеуге қабілеттілігін көрсетеді. Борды беріктеуші микролегіруші элемент ретінде қолданудың тиімділігі оның басқа

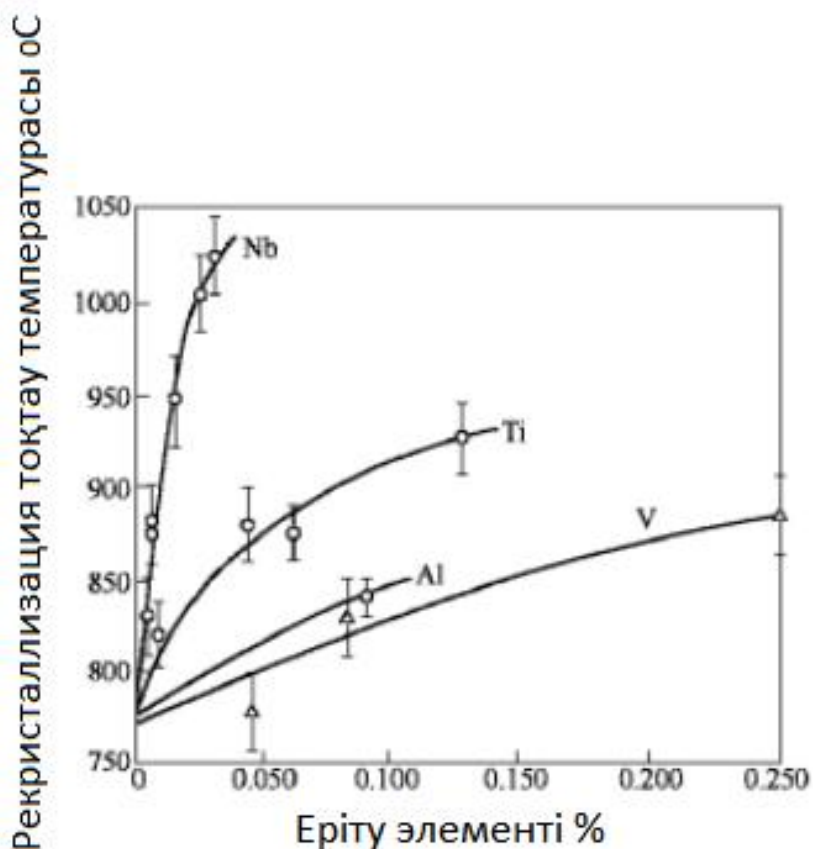
элементтерге караганда (Ni , Mo) арзанырақ бағасында жатыр.

Алюминий көбіне қалпына келтіргіш ретінде және дән үлкеюін басқару ретінде қолданады. Ол нитрид (AlN) бөлшектерін құрады, $\gamma - \alpha$ трансформациясы кезінде ұсақ феррит дәндерін құруға мүмкіндік.

Рекристаллизацияны тоқтату температурасына әсер ететін әртүрлі микролегірлеуші элементтердің арасындағы төмен әсерімен ерекшеленеді. (сурет-4)

айырмашылығы төменгі суретте көрсетілген. Мұнда, микролегірлеуші элементтерінің карбидтері мен нитридтерінің арқасында дән шегінің тіркеу күштері рекристаллизацияға түрткі күші болатын айтарлықтай жоғары болады. Сондықтан ол рекристаллизацияны тоқтату температурасының ($T_{5\%}$) жоғарлауына әсерін тигізеді.

$T_{5\%}$ -ке ең жоғары әсерін ниобий көрсетеді, ал ванадий айтарлықтай



Сурет 4 – Болат 0.07C-0.225Si-1.40Mn микролегірлеуші элементтердің құрамына байланысты рекристаллизацияны тоқтату температурасына әсері [4].

Қазіргі таңда ТМӨ аралық критикалық өңдеу немесе жылы өңдеу ретінде қабылданды. Аралық критикалық өңдеу (АКӨ) феррит+аустенит ($\alpha+\gamma$) аумағында Ar_3 температуралық диапазонынан сәл жоғары және Ae_3 температурасынан төмен (тепе-теңдікті $\gamma - \alpha$ трансформация температурасы). Термомеханикалық өңдеу әртүрлі болаттардың маркаларын аралық критикалық аумақтарда көптеген зерттеулер жүргізілген. Жылы илемдеу төмен көміртекті болаттарды Шеффилд университетінде зерттеген болатын [13]. Зерттеулердің негізгі маңызы әртүрлі илемдеу жолдарын қолданып беріктікті ұлғайту.

Аз көміртекті болаттарды аралық критикалық өңдеу кезінде пластикалық ағымның кернеуін модельдеу және жылы илемдеуден кейін С-Мп болаттардың микроқұрылымы мен текстурасының дамуын А. Бодин және оның шәкірттері зерттеген. Мұнда олар соңғы элементтер

әдісі (FEM) және микроқұрылымның дамуын болжауға жататын қоспа ережесі арасындағы айырмашылықты көрсетті. Мұнда қоспа ережесін микроқұрылымды немесе дән өлшемінің деңгейінде қолдануға болмайтынын көрсетті. Аз легіріленген аса берік болаттарды (X52) аралық критикалық өңдеудің аққыштық және әсер ету қасиеттеріне әсерін Адем Баккалоғлы зерттеген [6]. Сонымен қатар, бұрынғы Кеңес дәуірінде Бернштейн М.Л. ТМӨ-дің теоретикалық және тәжірибелік негіздіріне қосқан үлесін айта кету керек [18]. Басқа да ТМӨ аралық критикалық өңдеу жолдарының бірі ультра ұсақ дәнді болаттарды алу.

Жылы илемдеудің артықшылығы бір жағынан, ыстықтай илемдеумен салыстырғанда төменірек илемдеу температурасында. Нәтижесінде энергияны жұмсау төмендігі, ал екінші жағынан болат өте ұсақ дәнді құрылымы бар дайын өнім ретінде жасалады.

Әдебиеттер тізімі

1. A.J. DeArdo, C.I. Garcia, E.J. Palmiere *Thermomechanical processing of steel*, Metals handbook, 10th edition, Vol.4, (Materials park, OH: ASM International, 1991), pp. 273-255.
2. B.K. Panigrahi *Processing of low carbon steel plate and hot strip – an overview*, Bull. Mater. Sci., Vol. 24, No. 4, August 2001, pp. 361–371.
3. G. Krauss *Steels: Processing, structure, and performance*, ASM International, 2005.
4. Y. Wang *Ultra-fined grained steels*, Metallurgical industry press, Beijing, 2003.
5. K. Sampath *An understanding of HSLA-65 plate steels*, JMEPEG 15 (2006), pp. 32-40.
6. A. Bakkaloglu *Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel*, Materials Letters 56 (2002), pp. 200–209.
7. Y.H. Bae et al. *Effects of Austenite Conditioning on Austenite/Ferrite Phase Transformation of HSLA Steel*, Materials Transactions, Vol. 45, No. 1 (2004), pp. 137-142.
8. J. Zrnik et al. *Effect of thermomechanical processing on the microstructure and mechanical properties of Nb–Ti microalloyed steel*, Materials Science and Engineering A319–321 (2001), pp. 321–325
9. M.-C. Zhao, K. Yang, Y. Shan *The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel*, Materials Science and Engineering A335 (2002), pp. 14–20.
10. L. Lan, C. Qiu, D. Zhao, X. Gao *Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Nb-Ti Microalloyed Pipeline Steel*, Journal of iron and steel research, international. 18(2), (2011), pp. 57-63.
11. R. Song et al. *Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels*, Materials Science and Engineering A 441 (2006) pp. 1–17.
12. *Guidelines for fabricating and processing plate steel*, Mittal Steel USA – Plate. www.mittalsteel.com.

13. D.N. Hawkins and A.A. Shuttleworth *The effect of warm rolling on the structure and properties of a low carbon steel*, Journal of Mechanical Working Technology, 2 (1979), pp. 333-345.
14. F.B. Pickering *Physical metallurgy and the design of steels*, (1978) Applied Science Publishers, London, pp. 66-82.
15. T. Gladman, *The physical metallurgy of microalloyed steels*, Institute of Materials, London, 1997.
16. L. Meyer, C. Strabburger and C. Schneider The effect and present application of the microalloyed elements Nb, V, Ti, and B in HSLA steels, HSLA steels: Metallurgy and Applications conference, November 1985, Beijing, Published by ASM International, 1986, pp. 29-39.
17. A. Bodin, J. Sietsma and S. van der Zwaag *Flow stress prediction during intercritical deformation of a low carbon steel with a rule of mixtures and Fe-simulations*, Scripta materialia 45 (2001) pp. 875-882.
18. Бернштейн М.Л. и др. Термомеханическая обработка стали. М., Металлургия 1983., 480 с.