

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ**

**Қ.И. СӘТБАЕВ атындағы ҚАЗАҚ
ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ**

Ғ. Нысанбай

МЕТАЛДАРДЫ ІСІРУ ПРОЦЕСІНІҢ ТЕОРИЯСЫ
I. ФИЗИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ

5B072400 - Технологиялық машиналар мен жабдықтар және
5B012000 – Кәсіптік білім беру мамандықтары студенттеріне арналған

Университеттің Ғылыми-әдістемелік кеңесі
оқу құралы ретінде ұсынған

Алматы 2012

Н 90 Нысанбай Ғ. Металдарды пісіру процесінің теориясы. I. Физикалық негіздері. Оқу құралы. – Алматы: ҚазҰТУ, 2012. – 145 б.
Сурет– 63. Кесте – 15. Әдебиеттер тізімі – 14 атау.

ISBN 978–601–228–337–2

Металдарды пісіру процесі халық шаруашылығының салаларында кең тараған технологиялық процесс. Мұнда жалғастырылған бөліктердің түйіскен беттерінде атомдар аралық байланыс күштері орын алып, монокристалл жалғас қалыптасады. Монокристалл жалғас қалыптасуы физика, физикалық химия заңдары негізінде өтеді. Ұсынылған оқу құралында пісірудің тек физикалық негіздері қаралады. Атомдар аралығында байланыс күштері орын алуына кедергілер, белсендіру энергиясы, монокристалл жалғас қалыптасуының үш сатылы және пісіру процесі өтуі үшін міндетті түрде зат және энергия орын алуы, энергия қолданбай пісірілген жалғас қалыптасуы мүмкін еместігінің теориялық негіздері келтірілген. Қолданылатын энергия түріне орай пісіру процесінің топтастырылуы берілді.

Балқытып пісіруде және қыздырып қысым қолданып пісіруде химиялық, электрлік т.б. энергия түрлерінің жылулық қуаты қолданылады. Газ жалыны, электр тогының жылулық қуаты және жылу таралу процесінің заңдылықтары пісіру процесіне қатынасты қамтылды.

Пісіруде жылулық көздерімен металды қыздыру жалпы түсініктері, жылулық есептеулердің пісіру шарттарына сәйкесті негіздері; жылуфизикалық шамалар және жылуалмасу процесі жайлы түсініктер; пісіруде жылулық көздерімен металды қыздырудың негізгі есептеу сұлбалары, олардың қолданылуы және жік металы кристалдану ерекшеліктері келтірілді.

Мұнда – пісіру процесінің технологиялық мәселелері қаралмаған. Алайда пісіру процесін әртүрлі жылу көздерін пайдаланып жүргізудің физикалық негіздері келтірілген. Әртүрлі пісіру тәсілдері – осы физикалық заңдылықтар негізінде өтеді. Сондықтан пісіру технологиясының негізі болып табылады. Оқу құралы – бакалавр, магистр, пісіру өндірісінде істейтін мамандарға пайдалы.

ЖОК 669.0(075.8)

Пікір жазғандар: Д.Н. Смағұлов – техн., ғыл., докт., профессор;
Т.С. Даулетбаков – техн., ғыл., докт., профессор;
С.С. Есқұлов – техн., ғыл., канд., профессор;
К.Т. Көшербаев – техн., ғыл., канд., профессор.

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің 2012 жылғы жоспары бойынша басылды.

ISBN 978–601–228–337–2

© Нысанбай Ғ.

© ҚазҰТУ, 2012

АЛҒЫ СӨЗ

Пісіру өнеркәсіпте, құрылыста кең қолдану тапқан технологиялық процесс. Жалғастыру тәсілдерінің арасында (топсалы, серіппелі, иінтректі, тойтармалы т.б.) тек пісіру тәсілінде монолит жалғас қалыптасады. Мұнда атом (молекула) аралық байланыс күштерінің орын алуына қол жеткізіледі, сондықтан пісіру жалғастырудың ең жетілдірілген, пісуі жеткен тәсілі, пісіру болып аталуы да осыған орай. Кейбіреулер, пісіру процесін дәнекерлеу деп атағысы келеді. Дәнекерлеуде өтетін физика химиялық процестер, ауқымы, тереңдігі, жағынан пісіруде өтетін физика химиялық процестерді толық қамтымайды. Керісінше, пісіруде орын алатын физика-химиялық процестер дәнекерлеуде орын алатын процестерді толық қамтиды. Сондықтан барлық елдерде дәнекерлеуді пісіру процесінің бірі түрі деп қарайды, ал пісіруді дәнекерлеу деп қарауға келмейді. Қазіргі өнеркәсіп, техникада пісірудің 100 артық түрі қолданылады, ал дәнекерлеудің 9 түрі бар. Қазіргі уақытта пісіру технологиясымен көміртекті, легирленген және жоғарғы легирленген болаттар, мыс және никель қорытпаларынан жеңіл металдар, титан, алюминий, магний қорытпаларынан да, баяу балқытын металдар: ниобий, тантал, молибден және вольфрамдардан да әртүрлі бұйым және құрылымдар өндіріледі. Пісіру тәсілімен металл және металл қорытпаларымен қатар кейбір керамикалық материалдар, пластмассалар, шыны және әртекті материалдардан монолит жалғас қалыптастыруға болады. Әртүрлі материалдарды пісіру технологиясының ерекшеліктері бар, олар материал ішкі құрылымы мен қасиетіне байланысты. Сонымен бірге металдарды пісіру процесі физикалық заңдылықтарға негізделген, бұл жинақталған түрде пісірудің физикалық негіздері деген түсінікпен қамтылады. Балқытып пісіруде балқыған металл ваннасында химиялық реакциялар өтеді, олар физикалық химиялық заңдылықтарына сәйкес тепе-теңдік бағытында өрбиді де, сәйкесті пісірілген жік құрамы мен қасиеті қалыптасады. Металдарды пісірудегі химиялық реакциялар жалпы алғанда пісірудегі металлургиялық процестер болып аталады.

Пісіру процесінің физикалық және химиялық, металлургиялық заңдылықтары пісірілген жік және жалғаста кернеу және деформация орын алуына алып келеді. Сондықтан пісіру процесі технологиясына қойылатын талаптар жоғарыда айтылған заңдылықтармен анықталады және пісіру процесінің теориясы болып табылады. Пісіру түрлерінің барлығын да сауатты технологиямен жүргізу үшін процестің теориясын білу және игеру қажет. Оқуды жеңілдету үшін пісіру процесінің теориясы үш бөлімнен тұрады. Бірінші бөлім – процестің физикалық негізі, екінші бөлім – пісірудегі металлургиялық процестер, үшінші бөлім – пісірудегі кернеу және деформация. Ұсынылып отырған оқу құралы – пісіру процесінің физикалық негізіне арналған. Мұнда пісіру процесінің физикалық мәні, пісіру процесінің топтастырылуы, пісірудегі жылулық процестері, пісіру жылулық көздерімен металдың қыздырылуы және пісіру ваннасы, металдың кристалдануы мен жік металының қалыптасуы мәселелері қаралған. Оқу құралы негізінен бакалаврларға арналғандықтан көлемі ықшамдалды. Оқу құралы тек студенттерге ғана емес, пісіру өндірісінде істейтін мамандарға және магистрларға да пайдалы.

Пікір білдірген және қолжазбаны дайындауға атсалысқан әріптестеріме шын жүректен алғысымды білдіремін. Осы тақырыпта қазақ тілінде тұңғыш жазылған еңбек, сондықтан әлі де жетілдіру қажеттігі әбден ықтималды. Еңбектедегі олқылықтардан құтылу және сапасын арттыруға бағышталған ұсыныстардың бәрін зор ықылас, ризашылықпен қабылдаймын.

Автор

I. ПІСІРУ ПРОЦЕСІНІҢ ФИЗИКАЛЫҚ МӘНІ

Қазіргі уақытта пісіру тек металдардан ғана емес кейбір бейметалл (шыны, пластмасса т.б.) материалдар және әртүрлі материалдардан монокристалл жалғас өндіруде қолданылады. Техника, өнеркәсіп, құрылыста металдардан пісірумен әртүрлі бұйымдар өндіру кең тараған. Осыған орай біз тек металдарды пісіру процесіне тоқталамыз.

Пісіру процесінің физикалық негізі. Әрбір қатты немесе сұйық дене өзара ішкі байланыс күштермен байланысқан атом, ион немесе молекулалар жүйесі болып табылады. Элементарлық бөлшектер аралығындағы ішкі байланыс күші коваленттік, иондық, молекулаларлық және металдық байланыс күштері болып келеді.

Коваленттік байланыс – екі атомға да тән ортақ электрон болуы нәтижесі. Пісіруде коваленттік байланыс металды бейметалмен жалғастыруда орын алады.

Ионды байланыс – бір атом электронының (бір немесе бірнеше электрондар) екінші атомға ауысуы нәтижесінде бір-біріне кері таңбалы зарядты иондар аралығында орын алатын байланыс.

Молекулаларлық (Ван-дер-Ваальсовтық) байланыс күштері ең осал және металдарға тән емес байланыс күштері. Пластмассаларды пісіруде орын алады.

Металдық байланыс – кристалдық құрылымда қалыптасады. Ал металдар кристалл құрылымды материалдар. Мұнда электрондарынан айырылған атомдар оң зарядты ион болып, кристалл торының түйіндерінде орналасады. Атомның сыртқы орбитасынан босаған электрондар кристалл торы түйіндерінде орналасқан оң зарядты иондарға ортақ жағдайда болып элементарлық бөлшектер аралық байланыс қалыптастырады. Атом аралық байланыс күштері гравитациялық, магниттік және электрлік күштерден құралады. Металдарда электрлік күштер ең үлкен шамалы. Кристалл торы түйіндері аралық қашықтық, тор түйіндерінің өзара әртүрлі орналасуы, яғни кристалл торының типтері, атомдардың энергетикалық әсерлесуімен анықталады. Белгілі типті кристалл торында геометриялық реттілікті орналасқан атомдардың, нақтылы температураға сәйкесті арақашықтығы кристалл торының параметрі болып табылады. Металдардың басым көпшілігіне кристалл торының параметрі $(3\div 5) \cdot 10^{-8}$ см болуы тән.

Кристалл торының параметрі тұрақты шама емес, ол атом аралық қашықтықтың орташа мәні. Атомдар өзінің орташалықты орнына қатынасты тербелісті қозғалыста болады. Нормальды температура жағдайында атомдардың тербеліс амплитудасы атомдар аралық қашықтығының орташа мәнінің $5 \div 10$ % құрайды және елеулі флуктуация бермейді.

Температура жоғарыланған сайын атомдардың жылулық тербелісі өседі, кристалл торының параметрі де өседі де, нәтижесінде атом аралық байланыс әлсізденеді (байланыс күші кемиді).

Кристалл торы түйіндерінің қатаң реттілікпен орналасуы және олардың ортақ электрондар қозғалысты өрісімен байланыстылығы қатты дененің (кристалл, металл) қасиетін анықтайды.

Шынайы кристалдар құрылымы, кристалдану жағдайына орай, толық жетілдірілмей бірқатар кемістіктермен қалыптасады. Мысалы, кейбір тор түйіндері атоммен толтырылмайды. Мұны «ойық» немесе «бос орын» болуы дейді. Әртүрлі қоспалар араласуы да кристалл торын дұрыс қалыптасудан ауытқытады; элементар бөлшектердің өзара оптималды орналасуынан жекеленген немесе жүйеленген ауытқулықтар (дислокациялар, блокты әр бағыттылық) орын алады. Аталған себептердің бәрі реалды (шынайы) кристалдың қасиетін төмендетеді. Идеалды кристалдың ішкі байланыс беріктігі реалды кристалдағыдан анағұрлым жоғары болып келеді.

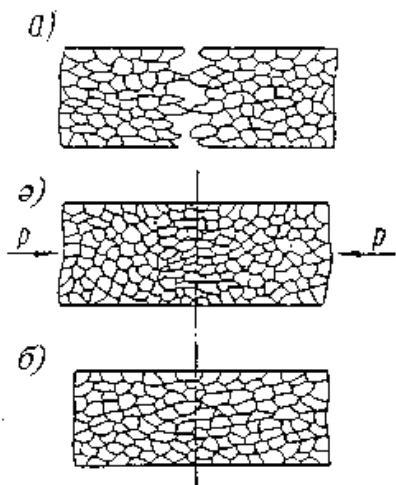
Әдетте өндірісте қолданылатын металдар құрылымы өзара монолитті тұтас байланысқан көптеген кристалдардан тұрады, яғни поликристалды құрылымды болып келеді. Бұл жағдайда әр кристалдың шеткі элементар бөлшектері іргелес кристалдың элементар бөлшектерімен әсерлесіп кристаллиттер аралық шекара қалыптасады. Кристалдық құрылымының кемелге жетілдірілмеуі кристаллиттер аралық межеде ішкі көлемдіктегіден басым. Себебі шекаралықта кристалл торының түйіндер реттілігіндегі ақаулықпен қатар, әртүрлі бөгде элементтер араласуы орталықтан жоғары болып келеді.

Кристаллиттердің үстіңгі бетінен ішкері орналасқан атомдарында байланыс күштері пайдаланған және өзара теңестірілген. Үстіңгі бет атомдарының бос байланыс күштері бар, бұлар бөгде атомдармен байланысқа түсе алады. Жекеленген газ атомдарының кристаллиттің үстіңгі бетіне адсорбциялануы, басқа қатты немесе сұйық дене атомдарымен әсерлесуі орын алады.

Екі қатты денені монокристалл тұтас дене етіп жалғастыру үшін олардың үстіңгі бет атомдары аралығында тікелей баланыс қалыптасуы немесе аралықты байланыс материалы арқылы жалғастыру шарт. Аралықты байланыс материалы жалғастырылатын денелердің әрқайсының үстіңгі бет атомдарымен тікелей байланысқа келеді. Денелердің үстіңгі бет атомдары арасында байланыс орын алуы үшін оларды кристалл торы параметрімен өлшемдес, яғни $(3 \div 5) \cdot 10^{-8}$ см қашықтыққа жақындату керек.

Қазіргі металл бұйым үстіңгі бетін әрлеу, жылтырату, өңдеу тәсілдері бет кедір-бұдырлығын $10^{-4} - 10^{-5}$ см шамасында тегістейді. Бұл арақашықтық атомаралық байланыс күшін қалыптастыруға жеткілікті жақындатудан $10^3 \div 10^2$ см шамасында артық. Сонымен бірге, жалғастырылатын аумақ үстіңгі бетінде бөгде элементтер қабаты (адсорбирланған газдар, тотық үлдірі, май, лас т.б.) орын алады. Сондықтан жалғастырылатын үстіңгі беттерді мұқият тазарту керек.

Пісірумен монокристалл жалғас қалыптастыру үшін жалғастырылатын бұйымның элементар бөлшектері аралығында физика-химиялық, атом-молекулаларлық байланыс күштері орын алуы керек.



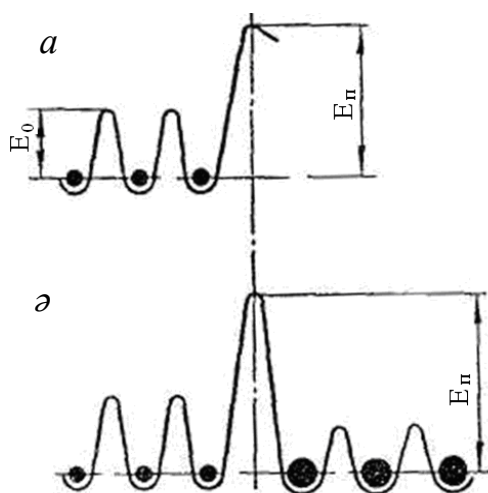
1.1-сурет. Монокристалл жалғас қалыптасу сұлбасы:
а) жалғастырылатын бөлшектердің
бастапқы түйісуі; б) жергілікті пластикалық
деформацияланып жалғасу; в) түйіріштіктер
шекаралығында құрылымның қайта
кристалданып (рекристаллизация) қалыптасуы

Жалпы алғанда ажырамайтын жалғас монокристалл тұтас және монокристалл емес болып қалыптасады. Монокристалл жалғастар пісіру, дәнекерлеу, желімдеу тәсілдерімен қалыптастырылады. Монокристалл емес жалғасқа тойтармалы шегемен жалғастыру т.б. жатады.

Атомдар кристалл торында элементарлы байланыс күші әсерімен симметриялы бағытталған күштермен теңгерілген күйде тұрақталады. Дененің үстіңгі бетінде атом теңгерілмеген күйде болады, сыртқы ортамен байланыс күші әсерлі болмаған немесе күш әсері осал

болғандықтан. Бұл құбылыс үстіңгі бет атом қабатының потенциалдық энергиясын E_n өсіреді.

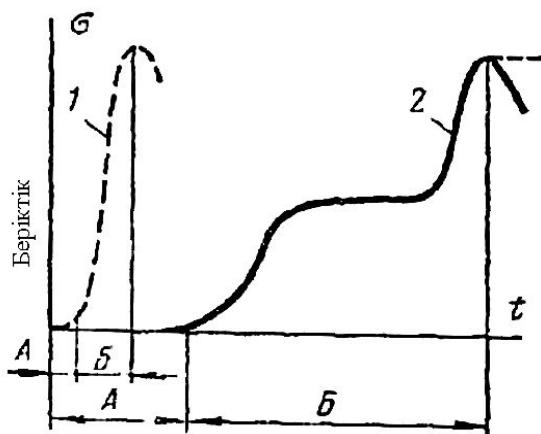
Сыртқы деформациялау механикалық энергиясы жақындас-тырылатын денелердің үстіңгі бет атомдарының кері итеру күшінің әсерін жеңуге қарышталады. Үстіңгі бет атомдарының арақашықтығы кристалл торындағы атом аралық қашықтыққа жуықтаған кезде атом электрондық қабықшаларының кванттық өзара әсерлесу процесі орын алады. Осыдан соң жүйенің жалпы энергиясы тұтас кристалл торы энергиясына сәйкестілікке келіп, E_0 -ға дейін төмендейді. Нәтижесінде монологит жалғас қалыптасады.



1.2-сурет. Кристалл үстіңгі бет атомдар жүйесінің потенциалдық энергиясының энергетикалық кедергісі:

a – үстіңгі бет атомдарында,
б – қатты және сұйық фазалар шекарасында, олардың өзара әсерлесуінің бастапқы кезеңде

Пісірілген жалғас қалыптасуының сатылары. Пісіруді топохимиялық реакциялар тобына жатқызуға болады. Топохимиялық реакцияларда микроаумақта берік жалғас қалыптасуы екі кезеңде өтеді. Макрокөлемде пісіру процесі, үшінші кезеңде – көлемдік диффузиямен аяқталады. Бұл процесте жалғас беріктігі өзгеруінің кинетикасы 1.3-суретте келтірілді.



1.3-сурет. Пісіру мерзімінің ұзақтығына сәйкесті пісірілген жалғас беріктігі өзгерісінің кинематикасы:

1 – физикалық түйісу баяу жүргенде (*A*);
2 – химиялық әсерлесу

Процесс дамуының бірінші кезеңінде (А), физикалық түйісу, яғни жалғастырылатын беттер атомдарының әсерлесу арақашықтығына жақындатылуы және үстіңгі беттердің өзара жалғасуға дайындығы орын алады. Екінші кезең Б – химиялық әсерлесу кезеңі. Микро-көлемде берік жалғас қалыптасуы аяқталады.

Іс-жүзінде монокристалл жалғас қалыптасу процесін күрделілікке әкелетін екі фактор бар:

- пісіруге арналған бұйымдардың үстіңгі беті микрокедір бұдырлы. Сондықтан олардың өзара физикалық түйісуі шектелген нүктелерде ғана орын алады;

- пісірілетін бұйым беттері бөгде атом, молекулалармен ластанған болып келеді. Қатты дененің үстіңгі бетінде қоршаған ортадан адсорбиrolанған атомдар және тотық үлдір қабат қалыптасқан болып келеді.

Сапалы жалғас орын алуы үшін үстіңгі беттерді басым бөлігінде немесе түгелдей түйісуге келтірілуі шарт. Мәселені қарапайымдату үшін үстіңгі беттегі бөгде ластану, тотықтарды қарастырмайық.

Екі қатты дененің үстіңгі беттерін бастапқы жағдайдан (микрокедір бұдырлы) шекаралық кристалдардың үстіңгі бетте толық өзара әрекеттесуге жеткізу үшін қысымдаушы күш P әсер етуі керек. Бұл күш әсерімен бұйымның үстіңгі беттерінде пластикалық деформация орын алып, микрокедір бұдырлардың жаншылып тегістелуі шарт.

Қарастырылып отырған жағдайда (металл үстіңгі беті ластанған, кедір-бұдырлық жойылған) екі бет аралығында үстіңгі бет энергиясының айрықшылық межесі жоқ, осыған орай үстіңгі беттер аралығында байланыс енді өздігінен орнығуы мүмкін боп көрінуі мүмкін. Іс-жүзінде олай емес. Айтылған жағдайда да жалғас қалыптастыру үшін энергия қарышталуы қажет. Энергия қарышталмай пісіру процесі жүрмейді. Бұл энергия үстіңгі бет атомдар жүйесінің потенциалдық энергиясына сәйкесті энергетикалық тосқауылдан өту үшін қажет. Сонда ғана үстіңгі бет атомдары кристалл торы параметріне пара-пар қашықтыққа жақындатылады да электрон өрістерінің әсерлесу мүмкіндігі, осыған орай энергия деңгейінің металды пісірумен жалғастырылуын сипаттайтын шамаға дейін төмендеуі орын алады.

Жоғары айтылғандарға сәйкесті қатты денелердің (металл) үстіңгі беттерінің біртұтас болып жалғасуында бөлшектер аралығында берік байланыс қалыптасуы үш сатылы өтеді:

а) түйіспеленудің өрістенуі (элементар бөлшектер өзара әсерлесуі орын алатын аралыққа жақындату);

б) жалғасу процесі өтетін энергетикалық әсерлесу.

Қарастырылған физикалық үлгі бір типті монокристалдарды пісіру процесімен жалғастыруда үстіңгі бет атомдарына оларды белсендіретін энергия келтірілуі қажеттілігін көрсетеді. Бұл энергияны белсендіру энергиясы деп атайды. Белсендіру энергиясы металл үстіңгі бетінде әртүрлі ластанудан туындаған кедергілерді жою үшін қажет. Белсендіру энергиясы жалпы алғанда металға жылу түрінде (температураны көтеру, термиялық белсендіру); серпімді – пластикалық деформация түрінде, механикалық белсендіру нәтижесінде көптеген құрылымдық ауытқулар, дислокациялар қысыммен шығарылады; электрон немесе ион сәулесімен әсер етумен (радиациялық белсендіру) берілуі мүмкін. Әдеттегі жағдайларда қыздыру және деформациялау қолданылады.

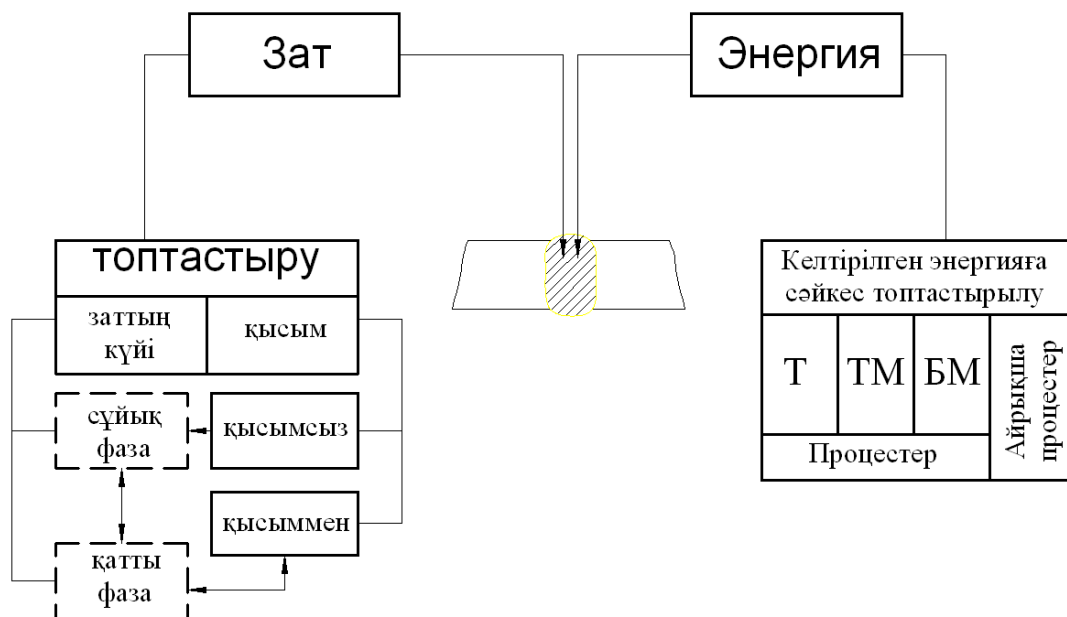
Үстіңгі қабатты белсендіру үшін үстіңгі бет атомдарына белгілі бір шамалы энергия беріледі. Бұл энергия дене атомдары мен сыртқы орта атомдары арасында байланысты үзу, дене атомдарын сыртқы орта атомдарымен қаныққан байланыс күштерінен босату; үстіңгі бет атомдарының энергиясын өзара байланысқа келуге кедергі энергия деңгейіне көтеру, яғни үстіңгі бет атомдарын белсенді күйге келтіру үшін қажет. Белсендіру энергиясы дененің үстіңгі бет атомдарына жылу, серпімді пластикалық деформация, электрон сәуле т.б. әсері түрінде беріледі.

в) үстіңгі бет атомдары арасында байланыс күштері әсері орын алып берік жалғас қалыптасқан соң, көлемдік диффузиялық процестер орын алады. Бұл пісіру процесінің үшінші сатысы.

Пісіру процесінің термодинамикалық анықтамасы. Пісіру процесінің анықтамасы – монокристал жалғас қалыптасудың физика-химиялық ерекшелігін талдаумен туындайды. Пісіру аумағында негізгі екі физикалық құбылыс өтеді. Бұл физикалық құбылыстар энергия түрі мен зат күйінің термодинамикалық қайталымсыз өзгерісімен байланысты: энергия берілуі мен оның өзгеруі; заттың құбылысы (қозғалысы). Энергия беру әрдайым пісіру процесі жүруінің шарты. Себебі энергия бермей үстіңгі атомдарын белсендіру мүмкін емес.

Берілген энергия түрі, оның қарқындылығы және өзгеру сипаттамасы пісіру процесінің түрін анықтайтын негізгі фактор.

Пісіру процесінің термодинамикалық анықтамасын сипаттау сұлба - үлгісі 1.4-суретте келтірілді.



1.4-сурет. Пісіру процесінің термодинамикалық анықтамасы және түрлерінің сұлба – үлгісі:

T, ТМ, БМ – термиялық, термомеханикалық, баспақ-механикалық процестер

Балқытып пісірудің кейбір түрлерінде, дәнекерлеуде қосымша зат (материя) қолдану орын алады. Бұл жағдайда балқытылған затпен қосымша энергия да келтіріледі. Пісіру аумағында заттың қозғалуы пісіру түріне орай айрықшаланып келеді. Балқытып пісіруде, әсіресе қосымша металл қолданып пісіру және дәнекерлеуде заттардың қозғалысы елеулі болып келеді. Қыздырып қысым қолданып пісіруде металл жиектері түйістірілген аумақта материалдың қозғалысы шамалы ғана, тек заттардың түйістірілген беттерде диффузиясы елеулі болып келеді. Салқындай пісіру іс-жүзінде заттың қозғалысысыз өтеді, егер дислокациялардың жылжуын және үстіңгі бетке шығаруын ескермесек.

Жоғарыда келтірілгендерді тұжырымдай келе пісірудің термодинамикалық анықтамасына келеміз.

Пісіру – денелердің түйіскен аумағында жылу мен механикалық энергия және заттардың термодинамикалық қайталымсыз құбылысы нәтижесінде материалдан монолит жалғас қалыптасу процесі.

Желімдеу, цементтеу т.б. монокристалл жалғас беретін процестердің пісіру, дәнекерлеу процесінен айырмашылығы, оларда арнайы энергия көзі талап етілмейді. Желімдеу, цементтеу процестері тек заттар келтіру арқылы (желім, цемент, су), заттардың құбылысы арқылы іске асады. Арнайы энергия көзі талап етілуі пісіру процесіне тән айрықшылық.

Металдарды пісіруде қалыптасқан жалғаста металдық байланыс күші орын алады.

Металдық байланыс күші – кристалл торы түйіндерінде орналасқан атомдар (атомдар иондаған) қаңқасымен валенттік бос электрондардың (электрондық бұлт) әсерлесу күші. Бұл күштер орталықты әсерлі күштер. (Мұнда кристалл торы қалыптасу мәселелері ашық қалдырылып отыр. Кристалда орталық әсерлі күштермен қатар қабырғалар бағытында әсер етуші күштер орын алады. Күштердің әртүрлі бағытталуы атомдардың торда әртүрлі орналасуына, осыған орай әртүрлі типті кристалл торы қалыптасуына алып келеді).

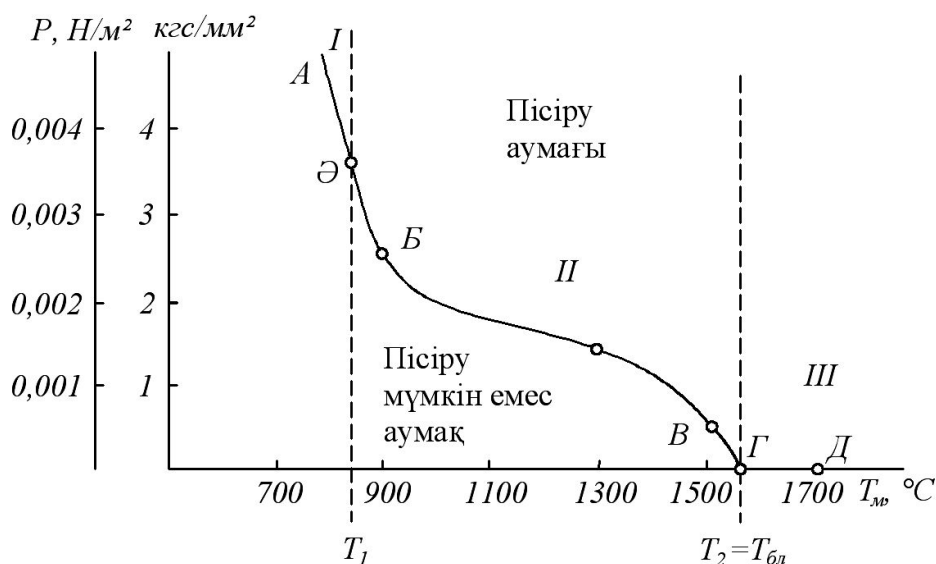
Пісіру процесіне технологиялық көзқараспен шолу жасайық.

Белгілі температураға дейін қыздыру әсерімен металдың деформацияға қарсылығы төмендейді, диффузиялық процестер үдеу алады және кристалдануға, мысалы жинақты рекристаллизация өтуіне, оң ықпал етеді. Сондықтан температураның жоғарылауы монокристалл да және поликристаллдарда да сапалы пісіру жалғасы қалыптасуына қажетті процестерге оң ықпал етеді. Қысым қолдану аталған оң ықпалды күшейте түседі.

Балқу температурасына дейін немесе одан да жоғары қыздыру нәтижесінде пісіруге жататын металл жиектері балқытылып, балқытылған қосымша металда қосылып өзара араласып, шағын көлемді сұйық металл ваннасын құрайды, мұны пісіру ваннасы деп атайды. Пісіру ваннасының кристалдануы нәтижесінде пісірілген жік металы қалыптасып монокристалл жалғас құрылады. Бұл жағдайда монокристалл жалғас қалыптасуы үшін қысым қолдану шарт емес.

Балқытпай пісіруде температура мен қысым пісіру процесінің параметрлері болып табылады. Әртүрлі металдар үшін пісіру процесі параметрлері қысым мен температураның өзара байланыстылығы әрқалай.

Мысал ретінде техникалық таза темір үшін пісіруде қысым мен температураның өзара байланыстылығы 1.5-суретте келтірілді. Бұйымның үстіңгі бетінде ешқандай ластану жоқ деп есептейміз.



1.5-сурет. Техникалық таза темірді пісіруде қысым мен температура арасындағы байланыстылық

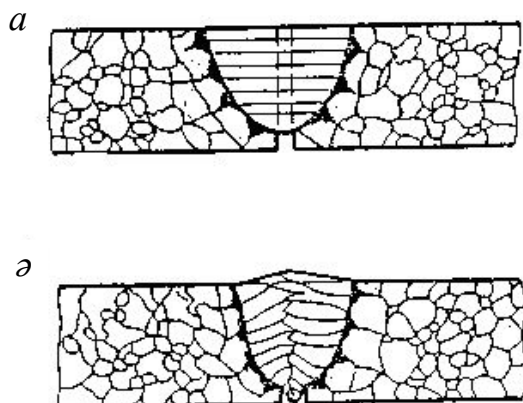
АЭБВГ қисық сызығы технологиялық параметрлер (P , T – қысым және температура) өрісін екі аумаққа бөледі. АЭБВГ қисық сызығынан жоғары аумақ қасиеттері негізгі металл қасиетіне пара-пар пісірілген жалғас қалыптасу аумағы. Аталған қисық сызықтан төменгі аумақта пісірілген жалғас сапасы төмен боп қалыптасады немесе пісірілген жалғас қалыптасуы мүмкін емес.

Металл температурасы T_m температура T_1 -ден төмен болған $T_m < T_1$ жағдайда пісірумен сапалы жалғас алу үшін өте жоғары, қазіргі уақытта техникалық мүмкіндігі өте шектеулі қысым қолдану қажет. Сондықтан аумақ I пісіру мүмкіндігі шектеулі аумақ болып саналады. Аумақ II-де температура T_1 және T_2 аралығында, $T_2 = T_{бл.}$, T_2 – металдың балқу температурасына $T_{бл.}$ тең сапалы пісіру процесін жүргізу үшін сыртқы қысым күшін қолдану қажет. Қажетті қысым P шамасы температура өскен сайын төмендеуде болады. Аумақ II іс-жүзінде қысыммен пісіруді жүргізу аумағы.

Температура $T_m > T_2$, яғни $T_m > T_{бл.}$ металдың балқу температура-сынан асқан жағдайда қисық сызық АЭБВГ абсцисса өсімен қосылып кетеді. Бұл жағдайда пісіру процесін жүргізу үшін қысым қолдану

қажет емес, $P=0$. Металл температурасы $T_m > T_{бл.}$. Осындай параметрлі пісіру балқытып пісіру болып табылады (аумақ III).

Балқытып пісіру сұлбасын былайша сипаттауға болады (1.6-сурет).



1.6-сурет. Балқытып пісіру сұлбасы:
*а – металл жиектерінің балқытылып
 пісіру ваннасы қалыптасуы;
 б – пісіру ваннасының кристалдануы
 арқылы пісірілген жік қалыптасуы*

Екі бөлек металл бұйымның жалғастырылатын жиектері іргелес шамалы қалыңдықты аумағымен жылу көзімен балқытылады. Балқытылған металл көлемі балқымаған метал аралығында сауыттағыдай сұйық металл ванна пішінді болады (1.6 а-сурет). Сұйық металл элементар бөлшектері балқымаған металл қабырғасына жұғу қабілеттілігіне орай максимальды жанасады. Бұл жанасу денелер аралығында қалыптасқан энергетикалық әсерлесу өрісіне сәйкесті орын алады. Сұйық металл қыздыру нәтижесінде белсендірілген қатты металл бетінде ағымдалып өзара жанасып байланысады, яғни адгезия орын алады. Егер жылу көзі қашықтаса металдың салқындауы нәтижесіне балқытылған көлем кристалданып қатаяды. Кристалдану бірінші кезекті қатты металға жанасқан қабаттан басталады, себебі қатты металл, жылу тартады да, онымен жанасқан сұйық металл беті салқындайды. Қатты металл мен кристалданған металл қабаты аралығында әдеттегі металдық байланыс қалыптасады. Қатты және балқытылған біртекті металдың кристалдануында ортақ кристаллиттер қалыптасады, олар бастапқы қатты және сұйық металдар шекарасын қиыстырады.

Қатты және балқытылған; қатты және кристалданып қатайған металдар арасындағы әсерлесу өзара диффузия процестерімен сипатталады.

Балқытылған металдың кристалдануының аяқталуында бастапқы екі бөлік металдан құрасқан, монолит жалғас қалыптасады.

Мұнда пісірілген жалғас сырттай қысым қолданылмай орын алады.

Егер жалғастырылатын металл жиектері аралығында саңылау болса, онда ол негізгі металға толық сәйкесті қосымша металмен, пісіру процесі ағымында, балқытылып толтырылады. Пісіру ваннасы балқытылған негізгі және қосымша металдардан тұрады және бұлар өзара мұқият араласып қатайды. Балқытылған металл массаларының толық араласуына жоғары температура әсері қолайлы жағдай болып табылады.

Қысым қолданып пісіруде қажетті температуралық аумақ металдар үшін әрқалай болып келеді. Техникалық темірді қысым қолданып пісіруде қыздыру температурасының төменгі мәні 700°C болып есептеледі.

Зор пластикалық деформация орын алғанда алюминий, қорғасын, мыс тағы кейбір салыстырмалы жеңіл балқитын металдарды пісіруде қыздыру қажеттілікті емес. Көміртекті болаттар құрамына орай қысыммен пісіруде қыздыру температурасының шамасы әрқалай болып келеді. Болат құрамында көміртек мөлшері өскен сайын болатты қысыммен пісіруде қалыптасқан жалғастың қасиеті негізгі металл қасиетіне парпарлығын қамтамасыз ететін қысым шамасы төмендей береді.

Тек біртекті металдарды және қорытпаларды ғана емес, әртекті, құрамы мен қосынды элементтер концентрациясы бірдей емес қорытпаларды да пісіру процесімен жалғастыру мүмкін. Мұндайда үш айрықша вариант орын алуы мүмкін.

1. Жалғастырылатын металдар өзара үзіліссіз қатты ерітінді қалыптастырады (Fe - Ni, Fe - Cr, Ni - Cu, Ni - Mn т.б.).

2. Жалғастырылатын металдар немесе жалғастырылатын қорытпа құрамындағы элементтер өзара ерітінді беруі шектелген, немесе толық ерімейді (Fe - Pb, Fe - Mg, Fe - Ag т.б.).

Бірінші жағдайда элементтердің үйлесімді бірге кристалдануы орын алады да кристалдарда да, олардың шекараларында да байланыс күштері қалыптасады. Екінші жағдайда жекеленген кристаллиттер шекарасында байланыс күштері рөл артады. Үшінші жағдайда байланыс күштері тек кристаллиттер шекарасында орын алады.

Біртекті металдарды пісіруде диффузия жалпы алғанда қасиеттер көрсеткіші жоғары жалғас қалыптастыруға оң әсерлі себепкер. Әртекті металдарды пісіруде бір металдан екінші металға диффузия орын алуы шекаралық морт химиялық қосынды қабаты немесе қасиеттері мақсатқа үйлесімсіз қабаттар қалыптасуына әкеліп, жалғас сапасын төмендетеді.

Айтылғандарды қорытындылай келе пісірудің технологиялық анықтамасын тұжырымдауға болады.

Пісіру – ажырамайтын монолит жалғас қалыптастыру технологиялық процесі. Мұнда жергілікті немесе жалпы қыздыру, немесе пластикалық деформациялау, немесе қыздыру мен деформациялауды қатар қолдану арқылы элементар бөлшектер (атом, ион, молекула) аралығында ішкі байланыс қалыптасады. Металдардан пісірілген жалғас үздіксіз құрылымдық байланыспен сипатталады.

II. ПІСІРУ ТҮРЛЕРІНІҢ ТОПТАСТЫРЫЛУЫ

Пісіру түрлерін топтастыру белгілі нышандары негізінде жүргізіледі. Олардың арасында кең қолданылатыны және шын мәнінде негізгілері пісіруде қолданылатын энергия түріне орай және пісіру аумағында металл күйіне (пісірілетін материал күйіне) орай топтастыру болып табылады.

Қолданылған энергияға сәйкесті пісіру түрлері мынадай түрлерге топтастырылады: **механикалық; химиялық; электрлік; электрмеханикалық; химия-механикалық.**

Механикалық энергия қолданып пісіруде аталған энергия пісіру аумағында металды пластикалық деформациялану күйіне келтіруі нәтижесінде пісірілген жалғас қалыптастырылады. Пісірудің бұл түрінде қыздырмай пісіру; үйкеліс әсерімен пісіру; қопарылыспен пісіру тәсілдері жатады.

Химиялық энергия қолдануда пісіру химиялық энергияның жылуға айналуын пайдалану арқылы жүргізіледі. Мұнда пісірудің екі түрлі тәсілі орын алады. Бірінші, химиялық реакция нәтижесінде бөлінген жылу қуаты металды пісіру аумағында қажетті температураға қыздыру, сонымен қатар қысым қолдану арқылы пісірілетін металл жиектерін пластикалық деформациялау арқылы пісіру. Екінші химиялық реакцияның жылу әсерімен пісірілетін металл жиектері мен қосымша металл балқытылған күйге келтіріледі де, (балқу температурасынан шамалы жоғары қыздырылады), қайта кристалдану нәтижесінде монокристалл жалғас қалыптасады. Бұл жағдайда қосымша механикалық энергия қолдану қажет емес. Химиялық энергиямен пісіруде жоғарыда айтылған қолдану қатарына газжалынымен пісіру тәсілі жатады, мұны қысқаша газбен пісіру деп атайды.

Электрлі пісіру түрлері электр энергиясының жылу энергиясына ауысуына негізделген. Бұл энергиялық құбылыс электр тогының өткізгіш арқылы өтуінде жылулық бөлінуі, шоғырланған электрондар ағынының кинетикалық энергиясының жылулыққа ауысуында, электр тогының қож қабаты арқылы өтуінде, әртүрлі жиілікті тоқты индуктрлендіруде және электр доғасында орын алады. Металды электр қуатымен балқытуға дейін қыздыру содан соң кристалдандыру арқылы пісіру қазіргі өнеркәсіпте кең тараған пісіру түрі болып табылады.

Электрмеханикалық пісіру түрі электр энергиясын жылу энергиясына ауыстыру арқылы металды пісіру температурасына дейін қыздырып, қысыммен (механикалық энергиямен) пластикалық деформациялауға негізделген. Электрлі түйіспелі пісіру тәсілдері пісірудің осы түріне жатады және өнеркәсіпте мол мөлшерде өнімдер жасауда кең өріс алған.

Химия-механикалық пісіру түрінде химиялық энергия жылуға айналып металл пластикалық күйге келгенше қыздырылады да, содан соң пластикалық деформацияланады. Пісірудің бұл түріне ертеден белгілі ұсталық пісіру жатады. Мұнда металл көріктен үрленіп жанған ағаш шоғында қыздырылып, төстікте балғамен соғу арқылы пластикалық деформацияланып пісіріледі. Қазіргі өндірісте металл газжалынымен қыздырылып баспақпен қысымдау арқылы пісірілген жалғас өндіріледі. Мұны газбаспақты пісіру деп атайды.

Пісіру аумағында металдың күйіне орай пісіру тәсілдері **қысыммен пісіру** және **балқытып пісіру** түрлері болып бөлінеді. Пісіру процесін осылай топтастыруды пісіруді технологиялық нышандары бойынша топтастыру дейді.

Қысыммен пісіру металды салқындай қысым әсерімен пісіру және металды балқу температурасынан $T_{\text{бл}}$ төмен температураға қыздырып қысым қолданумен жүргізіледі. Қысым шамасы пісіру температурасына дейін қыздырылған металды пластикалық деформациялауға жеткілікті болуы шарт. Қысыммен пісіруде кей жағдайда (мысалы, түйіспелі пісірудің түйістіріп пісіру тәсілінде), пісіру аумағында металл шамалы мөлшерде балқытылып балқыған металл түйіскен жиектерден үстіңгі бетке қысыммен шығарылып, балқыған қабат астындағы жоғары температураға қыздырылған тотықпаған металл беттері түйістіріліп пісіріледі.

Қысыммен пісірудің балқытып пісіруден тиімділікті жақтары бар. Мұнда қыздыру температурасы салыстырмалы төмен металдың қыздыру әсерінен құрылымдық өзгерістерге шалдығуы төмен. Пісіру операциясына қарышталатын энергия шамасы да төмен.

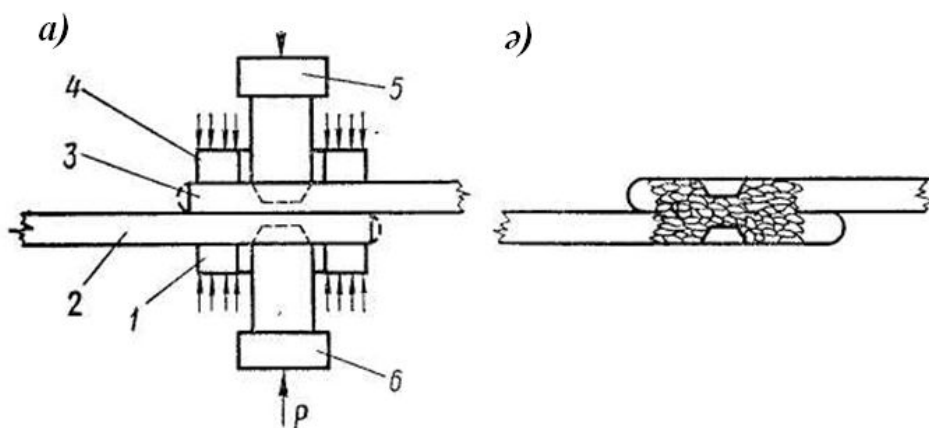
Балқытып пісіру бұйым жиектерін жергілікті балқытумен жүргізіледі. Балқытылған шағын көлемді металдың кристалдануы нәтижесінде монолит жалғас қалыптасады.

Балқытып пісірудің қысыммен пісіруден салыстырмалы тиімділіктері бар. Қысыммен пісіруде басым көпшілік жағдайда пісірілетін металл энергия көзіне (пісіру аппаратына) келтіріледі. Балқытып пісіру-

де энергия көзі пісіру орнына келтіріледі. Бұл ірі габаритті (ірі шетті мөлшерлі) құрылымдарды пісіруде өте тиімді. Алайда, балқытып пісіруде балқытылған металдың қоршаған ортамен әсерлесуі (газ, конденсирленген фазамен) жоғары, нәтижесінде металлургиялық процестерге тән бірқатар реакциялар өтеді. Бұл реакциялар және физикалық процестер кристалданған металл қасиетіне (пісірілген жік металы) кей жағдайларда теріс әсер етуі ықтималды. Сондықтан металлургиялық процестердің тиімді нәтижелі өрбуін қамтамасыз ететін шаралар қолданылады (флюс, газбен пісіру аумағын оқшаулау, вакуумда пісіру).

2.1. Металдарды пісірудің негізгі түрлері

Қыздырмай пісіру – металды қыздыру қолданбай елеулі пластикалық деформациялаумен жүргізіледі. 2.1-суретте келтірілгендей екі тілме металл 2 және 3 айқастырылып тығырықтар 1 және 4 пен қыспақталған. Тығырықтар пісіру орнына пластикалық деформациялаушы күштер әсерімен металдың ісінуіне (дөңкіштелуіне) жол бермейді. Қаттылығы пісірілетін металл қаттылығынан жоғары қорытпадан жасалған қысымдау сотандары 5 және 6 металды деформациялайды.



2.1-сурет. Металды қыздырмай пісіру сұлбасы:

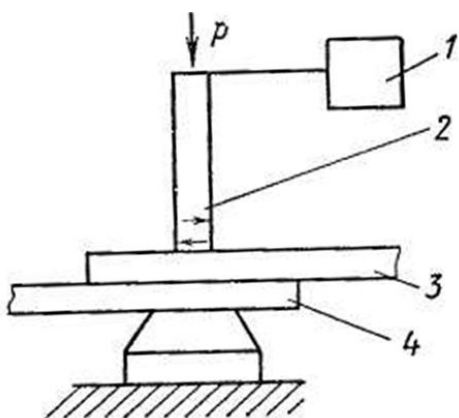
1,4 – металды қыспақтаушы тығырықтар; 2,3 – пісіруге жататын металл тілмелер; 5,6 – пісіру қысымын келтіруші сотандар;
а) – қыздырмай пісіру сұлбасы; ә) пластикалық деформация нәтижесінде металдың ішкі байланыс құрылымы қалыптасу сұлбасы

Сотандарды металл денесіне батыру шамасы өсе келе тілмелер 2 және 3 түйісу беттерінде пластикалық деформациялану өседі

(2.1 ә-сурет). Металл үстіңгі беттері алдын ала дат, май т.б. ластаулардан мұқият тазалануы шарт. Жұқа тотық қабаттар металдың пластикалық ағымдалуында күйреп металл беті тазартылады да тілме 2 және 3 таза беттері (ювенильдік беттері) өзара түйісіп, пластикалық деформацияланып, металдық ішкі байланыс күштері орын алып пісірілген монолит жалғас қалыптасады. Айтылғандай жалғас қалыптасуына қажетті деформациялау дәрежесі металдың қасиеттеріне, үстіңгі беттегі үлдір тотық қасиеттеріне және деформациялау сұлбасына тәуелді.

Қыздырмай пісіру тек созымталдығы жоғары, жұмсақ металдар үшін қолданылады және әдетте айқас жалғас қалыптастырылады.

Ультрадыбыспен пісіру. Бұл тәсілмен үстіңгі беттегі тотық үлдірін бұзып ювенильді беттері түйісуге келтіру үшін елеулі жалпы деформациялаусыз, тілмелер шек аралығында шағын ауданды деформациялау арқылы пісірілген жалғас қалыптастыруға болады. Бұл мақсат ультрадыбыс қолдану арқылы жүргізіледі. Ультрадыбысты пісіру сұлбасы 2.2-суретте келтірілді. Ультрадыбыс генераторы 1 жұмыс аспап 2 арқылы пісіруге арналған жұқа металл тілмелер 3 және 4-ке амплитудасы шамалы ультрадыбысты келтіреді. Ультрадыбыс толқындарының қуаты жеткілікті болған жағдайда (әдетте толқын жиілігі 8000-15000 Гц аралығында) металл үстіңгі бетіндегі тотықтарды талқандайды және металл жергілікті $200-350^{\circ}\text{C}$ -қа қыздырылады да тазарған металл беттерінде пісірілген жалғас қалыптастырылады. Пісірілетін беттер жеткілікті дәреже түйістірілуі үшін қосымша қысым беріледі.



2.2-сурет. Ультрадыбыспен пісіру сұлбасы:

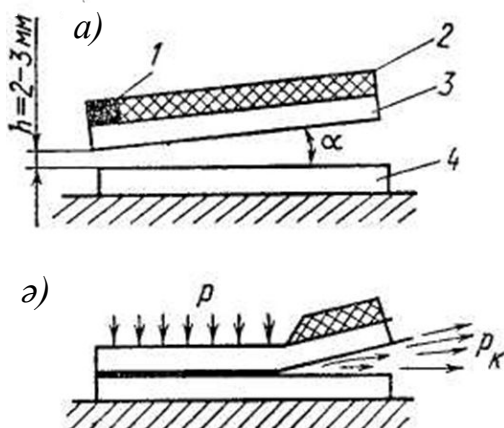
1 – ультрадыбыс генераторы;

2 – жұмыс атқарушы аспап;

3 және 4 пісіруге арналған металл тілмелер

Ультрадыбысты пісіру әдетте жұқа элементтері жалғастыру үшін және жұқа элементі қалың бұйымға жалғастыру үшін қолданылады.

Қопарылыспен пісіру. Жоғары жылдамдықты қозғалысты бөлшектердің бастапқы температура әдеттегі жағдайда соқтығысуы нәтижесінде пісірілген жалғас қалыптасады. Қопарылыспен пісірудің жалпы сұлбасы 2.3-суретте келтірілді. Қатаң табанға (негізге) табак металл 4 орналастырылады. Оның үстіне шамалы өрлеу ($\alpha = 2 \div 15^\circ$) бұрышымен табак металл 3 орналастырылады. Табак металлдың үстіңгі бетіне біркелкі қалыңдықты етіліп есептелген шамалы массалы жарылғыш зат 2 (аммонит, гранулит т.б.) төселеді. Қопарылысты бастамалы қоздыру үшін тұтандырғыш зат 1 пайдалынады. Тұтандырғыштан басталған қопарылыс толқыны металл 3 үстіңгі бетінде жоғары қысым P туындырады да үстіңгі металл 3 төменгі табак металлға лақтырылып түсіріледі (2.3 ә-сурет). Металл үстіңгі беті кумулятивтік газ ағынымен тазартылады. Кумулятивтік газ ағыны қысымы өте жоғары, $P_k = 1$ млн. кг·с/см² $\approx 10^{11}$ Н/м², жылдамдығы да аса жоғары ~ 6000 м/сек шамалы болып келеді. Деформациялану аумағы салыстырмалы төмен, кристалл торының $100 \div 300$ параметрімен өлшемдес болып келеді. Пісірілген жалғас микрорельефтері бойынша толқын түрлі болуы жиі кездеседі. Елеулі мөлшерлі (мысалы, үстіңгі бет ауданы м² өлшемді табак металл) бұйымдарды пісіру арнайы полигонда, мөлшері шағын бөлмешіктерді вакуумды бөлмешектерде жүргізіледі.



2.3-сурет. Қопарылыспен пісіру сұлбасы:

а) пісіруге дайындамалық құрастыру;

ә) пісіру процесінің өтуі.

1 – қопарылысты туындатушы бастамалы тұтандырғыш зат;

2 – жарылғыш зат (аммонит, гранулит, т.б.); 3, 4 – пісірумен жалғастырылатын табак металдар

Ұсталық пісіру ертеден белгілі пісіру түрі. Мұнда пісірілетін металл көрікте пісіру температурасына дейін қыздырылып, төстікте орнықтырылып қолдан балғамен соғу арқылы пластикалық

деформацияланып пісіру процесі жүргізіледі. Қазір балғамен соғудың механизацияланған тәсілі бар. Кейде металл үстіңгі бетін тотықтан тазарту үшін (болатты пісіруде әдетте FeO). Флюс ретінде құм (SiO_2) пайдаланады. Нәтижесінде балқу температурасы FeO балқу температурасынан төмен кешенді қосынды $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ немесе $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ қалыптасады. Балқытылған кешенді тотық балғамен соғу әсерімен пісіру аумағынан ағымдалып шығарылады.

Газбаспақты пісіру ұсталық пісіруге сәйкесті. Мұнда пісіру орнын қыздыру үшін жанаргаз жалыны қолданылады. Жалын қуатын реттеу мүмкіндігі кеңейіп, жергілікті қыздыру мүмкіндігі артады. Металл пісіру температурасына дейін қыздырғанда баспақты қысым арқылы пластикалық деформациялану орын алып пісірілген жалғас қалыптасады. Газ жалыны пісіру аумағынан шығарылғанда жоғары температураға қыздырылған металл жиектері ауадағы оттегімен қарқынды тотығады. Сондықтан металл жиектерін балқу температурасына дейін (одан сәл жоғары да) қыздырады. Баспақпен қысымдау кезінде балқытылған металл ағымдалып шығарылып тотықпаған жоғары температуралы таза металл беттері өзара түйісіп пісірілген жалғас қалыптасады. Пісірудің бұл түрі құбырларды түйістіріп жалғастыруда және көміртекті болаттардан жасалған теміржол көліктерінің тетіктерін жалғастыруда қолданылады.

Электрлі түйіспелі пісіру. Пісірудің бұл түрі электр тогының өтуінде өткізгіште бөлінетін жылу қуатын пайдалануға негізделген. Электр тогы өткізгіш арқылы өткенде бөлінетін жылу қуаты

$$Q = 0,24 IUt, \text{ кал немесе } Q = I^2 R t, \text{ Дж,}$$

мұндағы Q – жылулық (кал, Дж); I – ток күші, А; U – кернеу, В; R – қарсылық, Ом; t – уақыт, сек.

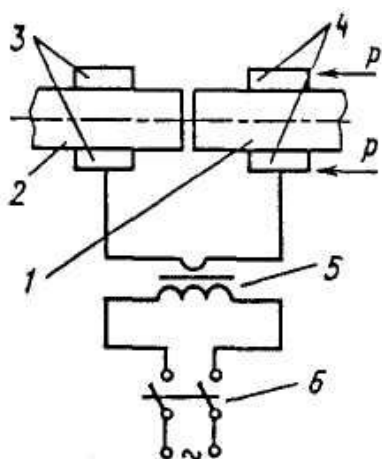
Тізбекті ток өткізетін желінің қарсылық шамасы жоғары аумақта жылулық шамасы да жоғары болады да, металл осы аумақта салыстырмалы жоғары температураға қыздырылады. Пісіру сұлбасында осындай аумақ пісірілетін металл үстіңгі беттерінің түйіскен аумағы болып келеді. Қыздырылған металға қысым келтіріліп, температура және қысымның бірдей әсерімен пісіру процесі өтеді. Пісіру өте тез $0,003 \div 10$ сек аралығында уақытта жүргізіледі. Әдетте қыздыру көзі ретінде кернеу шамасын төмендететін трансформатор қолданылады, сәйкесті ток шамасы жоғары болып келеді. Түйіспелі пісіру негізгі үш

түрге: электрлі түйістіріп пісіру, электрлі нүктелі пісіру; электрлі тігісті (жікті) пісіру болып бөлінеді.

Электрлі түйістіріп пісіру екі түрлі сұлбамен жүргізіледі: электрлі қарсылықпен пісіру; балқытып пісіру.

Электрлі қарсылықпен пісіруде (2.4-сурет) жалғастырылатын бөлшектер 1 және 2 пісіру машинасының жылжымалы 4 және қозғалыссыз 3 қыспақтағыш механизмінде өстері сәйкестікке келтіріп қыспақталып бекітіледі. Белгілі шамалы қысыммен 1 және 2 бөлшектер өзара түйістіріледі. Трансформатор 5 қосқыш 6 арқылы электр-желісіне қосылып түйістірілген бөлшектер 1 және 2 арқылы ток өтеді. Ток белгілі шамада алдын ала анықталып реттелген.

Бұйымдар беттері түйіскен ауданда қыздыру жоғары болады (электрлі қарсылық ең жоғары шамада болатындықтан). Бұйым үстіңгі бетінің кедір-бұдырлығына байланысты баспақты түйісу жекеленген нүктелерде орын алады. Температура өсуіне орай қысым p әсерімен кедір-бұдырлар пластикалық деформацияланып тегістеліп бұйымдар үстіңгі бет ауданын толық қамтып түйістіріледі. Металл жиектері пісіру температурасына дейін қыздырылғанда (балқу температурасынан төмен) қысым p шамасын өсіріп (кейде қысым шамасы тұрақты ұсталады), пластикалық деформацияланады, мұны металл жиектерінің шөктірілуі дейді. Нәтижесінде пісірілген жалғас қалыптастырылады.

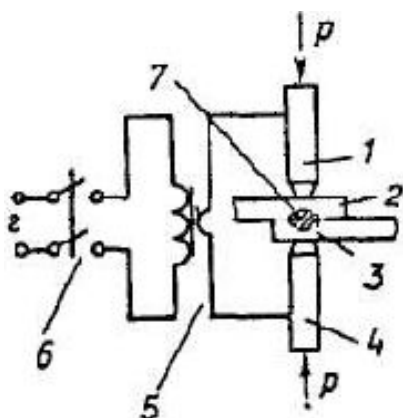


2.4-сурет. Электрлі қарсылықты түйістіріп пісіру сұлбасы:
1,2 – пісірумен жалғастырылатын бөлшектер;
3,4 – бөлшектерді қыспақтау механизмі;
5 – трансформатор; 6 – қосқыш;
 p – жылжымалы қыспақтағышқа келтірілетін күш

Балқытып пісіруде электрлік кернеу жалғастырылатын бұйым жиектері түйістірілмей тұрып, яғни металл жиектері аралығында саңылау бар жағдайда, беріледі. Жылжымалы қыспақта бекітілген бөлшек 1 баяу жылжып бөлшек 2 мен жекеленген нүктелерде түйіседі

де, әр түйісу нүктесі балқиды. Бірте-бірте бұйымдар үстінгі беттері толық балқытылып түйіскен күйге келеді, балқытылған бет астында жоғары температураға қыздырылған қатты қабат түйіседі. Берілген мерзімде қосқыш 6 пісіру тогын ажыратып, бұйымдар қосымша қысыммен шөктіріледі. Бұл жағдайда балқыған металл қалдығы қысыммен ағымдалып шығарылып, жоғары температураға қыздырылған металл беттері түйістіріліп пластикалық деформацияланып пісірілген жалғас қалыптастырылады.

Нүктелі түйістіріп пісіруде шамалы қалыңдықты металл бөлшектер 2,3 айқастырылып электродтар 1,4 аралығына қыспақталады (2.5-сурет). Электродтардың жұмыс атқару беті сәл дөңкішті тегіс болып келеді. Электродтар арқылы пісіру аумағына электртогы және қысым Р беріледі.

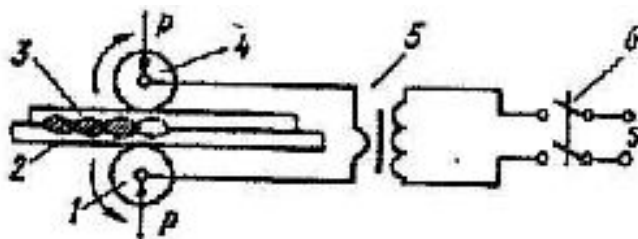


2.5-сурет. Электрлі нүктелі түйістіріп пісіру сұлбасы:

1,4 – электродтар; 2,3 – пісірілетін металл бөлшектер; 5 – трансформатор; 6 – қосқыш; 7 – пісірілген жалғастың құйма құрылымды нүкте өзегі

Электродтың біреуі қозғалыссыз орнықты, екіншісі жоғары-төмен бағытта жылжымалы болады. Электрод арқылы металл беттерін жеткілікті дәрежелі тегіс түйістіруге қажетті қысым және пісіру қысымы келтіріледі. Пісіру тогы қосылып және өсірілген қысым келтіріліп элементтер 2,3 шағын аумақта (мұны нүктеде дейді) балқытылып қатаяды да, өзегі құйма құрылымды пісіру нүктесі қалыптасады. Пісіру қысымы берілген кезде ток ажыратылады.

Тігісті түйіспелі пісіру нүктелі пісіруге сәйкесті жүргізіледі. Әр келесі пісіру нүктесі өткен нүктеге сәл айқастырылып салынады. Нәтижесінде тығыз орналасқан үздіксіз қалыптасқан пісіру нүктелері тізбегі қалыптасады, мұны тігіс деп атайды (2.6-сурет).

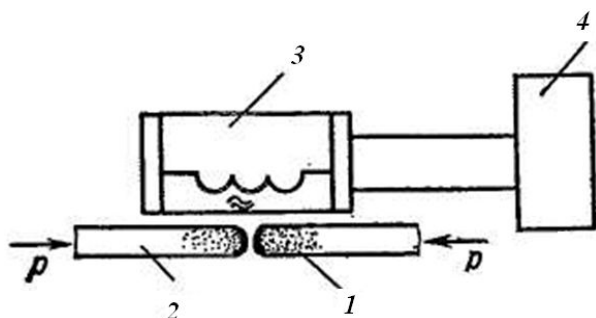


2.6-сурет. Электрлі тігісті пісіру сұлбасы:
1,4 – электродтар; 2,3 – пісірілетін металл;
5 – трансформатор; 6 – қосылғыстырғыш

Пісіруге жататын элементтер 2,3 электродтар 1,4 аралығында қыспақталады. Электродтар қалыңдығы пісіру нүктесінің диаметрін қалыптастыратын мыстан жасалған дөңгелек. Электродтардың біреуі жоғары – төмен бағытта жылжымалы, пісіруге жататын элементтерді қыспақтау үшін. Екі электродта бір орнында айналмалы қозғалысқа келеді. Нәтижесінде электродтар аралығында қыспақталған металл түзу сызықты жылжымалы қозғалысқа келтіріледі. Ток қосылуы үзілісті болып келеді, әр қосылу ұзақтығы бір нүктені пісіру уақытына сәйкесті автоматты реттеледі. Токтың ауысымды қосылып – ажыратылуы нәтижесінде тізбекті үзіліссіз пісіру нүктелері салынып, тігісті пісірілген жік қалыптасады.

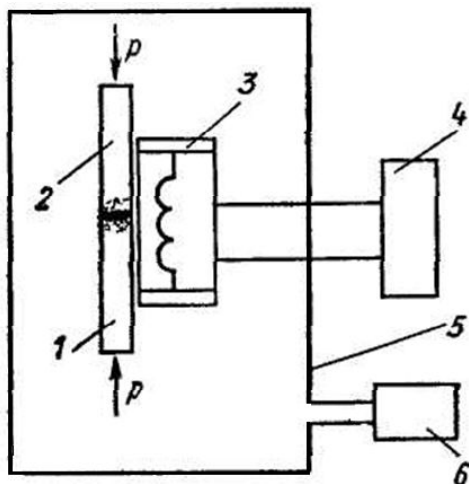
Индукциялық токпен пісіру. Пісірудің бұл түрінде металды пісіру температурасына дейін қыздыру металда индукциялық ток туындаумен жүргізіледі, қысқартылып индукциялы пісіру деп аталды. Арнайы индуктор 3 нәрлендіргіш 4-тен жоғары жиілікті айналмалы токпен нәрлендіріледі (2.7-сурет).

Пісіруге жататын элементтерде 1,2 индукциялық ток өрісі қалыптасады. Негізінде металл жиектерін балқытуға дейін қыздыруға болады. Әдетте металл балқу температурасынан төмен температураға қыздырылып қысыммен пісіру процесі жүргізіледі.



2.7-сурет.
Индукциялы пісіру сұлбасы:
1,2 – пісірілетін жалғас
қалыптастыратын бөлшектер;
3 – индуктор; 4 – индукторды токпен
нәрлендіргіш; p – пісіруге қажет қысым

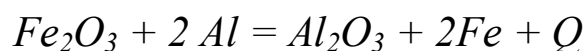
Диффузиялық пісіру вакуумда жүргізіледі. Жалғастыратын бұйымдар 1,2 алдын ала арнайы бөлмешікке 5 орналастырылады. Бөлмешіктен сорап арқылы ауа шығарылады, 10^{-3} – 10^{-5} мм сынап бағасына ($0,13$ – $0,0013$ Н/м²) вакуумға дейін. Аталған вакуум орын алған соң нәрлендіргіш 4-тен келтірілген индуктор 3 арқылы индукциялық токпен бұйымдар 2,3 қыздырылып қысым p қолданып пісіру процесі жүргізіледі (2.8-сурет).



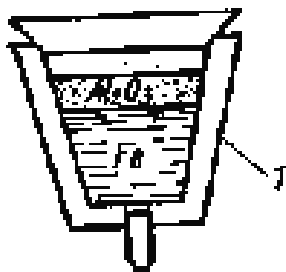
2.8-сурет. Диффузиялық пісіру сұлбасы:
1,2 – жалғастырылатын бөлшектер;
3 – индуктор; 4 – индукторды
токпен нәрлендіргіш; 5 – вакуумды
бөлмешік; 6 – сорап

Пісірудің бұл түрі – химиялық белсенділігі жоғары, жоғары температурада атмосфера газдары оттегі, азот, көміртек т.б. әсерлесу нәтижесінде қасиет көрсеткіштері күрт төмендейтін металдарды ауадан толық оқшаулап пісіруді іске асырады. Вакуум металл үстіңгі бетін тотығудан сақтайды, кейбір жағдайда қыздырылған металл бетіндегі тотықтар ыдырайды. Сонымен қатар, металл беті адсорбирланған газдардан тазарады. Диффузиялық пісіру химиялық белсенділігі жоғары металдарды пісіруде, металмен бейметалл материалдардан пісіру аумағында салыстырмалы төмен деформациялап пісірілген жалғас өндіруде өте оң нәтижелі қолданылады.

Термитті пісіру. Пісірудің бұл түрінде оттекке ынтықтығы жоғары элементтің ұнтақ тотықпен әсерлесу нәтижесіндегі экзотермиялық химиялық реакцияның жылуы пайдалынады. Мысалы, отқа төзімді материалдан жасалған отбақырашта (2.9 – сурет) теміртотығы Fe_2O_3 және ұнтақ алюминий Al араластырылып салынып, жергілікті $\sim 750^0$ С шамасында қыздырылса, төменде келтірілген реакция көлемді толық қамтып өтеді.



Оңтайлы жағдайда реакция өнімдері (Al_2O_3 , Fe) теориялық негіздеме бойынша $\sim 3000^{\circ}C$ -қа дейін қыздырылады. Практикалық жағдайда температура төмен $2200\text{--}2400^{\circ}C$ шамасында болады.



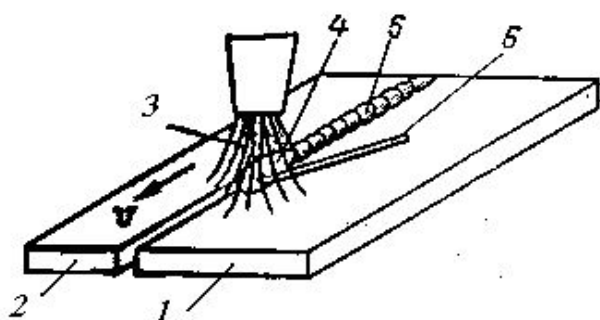
2.9-сурет. Теміртотығы (Fe_2O_3) және ұнтақ алюминийдің (Al) экзотермиялық реакция нәтижесі:
I – отбақыраш

Бұл температуралық жағдайда темір және Al_2O_3 балқыған күйде болады да, өзара ерітінділмейтін заттар болғандықтан тығыздығына сәйкесті бөлініп орналасады: төменде тығыздығы жоғары темір, үстіңгі бетте жеңіл алюминий тотығы. Бұл балқыған металда аккумулярленген жылулық пісіру аумағында жалғастырылатын металл жиектерін қыздырып қысыммен пісіруге немесе балқытып пісіруге, құйма бұйым үстіңгі бетіндегі ойықты балқытып пісірумен толтыруға қолданылады. Пісірудің басқа түрлері арасында термитті пісірудің ауқымы шектелуі шамалы.

Лазерлі пісіру. Оптикалық кванттық генераторлар жасалған соң когерентті сәуле, яғни лазермен айырықша сипатты қалыптасқан сәуле, энергиясын пісіру процесінде қолдану мүмкін болды. Үздіксіз сәуле шығаратын қондырғылар бар. Үйектелген шоғырлы сәуле бұйым бетінде жоғары тығыздықты энергия бөледі. Бұл энергия аса баяу балқытын металл және қосындыларды балқыту және буландыруға жеткілікті болып келеді. Сәуле қуатын реттеу арқылы металды жергілікті балқытып пісіру және үздіксіз жік салып пісіру, үстіңгі бетке балқытып білікше қаптастыру процестерін жүргізетін қондырғылар бар.

Газбен (газжалынымен) пісіру. Мұнда жылу көзі жанаргаздардың жоғары температуралы жалыны. Жанаргаздар оттеппен әсерлесіп экзотермиялық химиялық реакциясының жылуын қолданып пісіру процесі жүргізіледі, яғни химиялық энергия металдарды қыздыру және қысым келтірумен немесе балқытып пісіру қолданылады. Газбен балқытып пісіру кең өріс алған (2.10-сурет). Пісірумен жалғастыратын бұйымдардың (1,2) жиектері шоғырланған газжалынымен 3 жергілікті

балқу температурасынан жоғары қыздырылса, балқыған жалғастыратын жиектерді бірдей қамтыған ванна 4 қалыптасады. Егер жалын металл жиектері бойымен (нұсқағышпен көрсетілген) белгілі жылдамдықпен қозғалыста болса, онда жалын аумағында ванна қалыптасып, жалын соңында алғашқы балқыған металл қатайып (кристалданып) пісірілген жік 5 қалыптасады. Металл жиектері аралығындағы саңылауды толтырып сапалы жік қалыптастыру үшін қосымша металл сым 6 қолданылады.



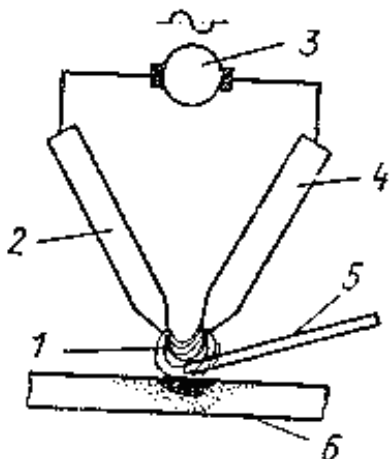
2.10-сурет. Газбен пісіру сұлбасы:
1,2 – жалғастыратын бөліктер,
3 – газжалыны; 4 – пісіру ваннасы
(балқыған металл); 5 – пісіру жігі;
6 – қосымша металл

Қосымша металл сымы немесе сотан негізгі металл жиектерімен бір мезетте балқытылады, құрамы негізгі металл құрамына, диаметрі металл қалыңдығына сәйкесті алынады. Жалын қуаты, құрылымы, қосымша металл диаметрі, пісіру жылдамдығы газбен пісіру ережесінің негізгі параметрлері болып табылады.

Электрдоғалы пісіруде металды пісіру температурасына дейін қыздыру (балқу температурасына дейін немесе оданда жоғары) электрдоғасының жылулық қуатымен жүргізіледі. Электрдоғасы – екі электрод аралығында ауа арқылы электр тогының ағындалуы. Әдеттегі жағдайда ауа электртогын өткізбейді. Егер ауа құрамындағы газдар ионданса, онда ауа ток өткізуге қабілетті болады. Ионданған ауада ағындалған электртогы аса жарық сәуле шашқан жалын сипатты, сырт пішіні доғаланып иілген болып келеді. Осыған орай бұл құбылысты тұңғыш ашқан (1802 ж.) проф. В.В. Петров электрдоғасы деп атаған, осы атау тұрақты қабылданып қалыптасып қалды. Электрдоғасының жылулық қуатын пісіру процесінде пайдалану игерілгенде ол электрдоғалы пісіру болып аталды. Электрдоғасының қолдану ерекшелігіне орай электрдоғалы пісіру өз кезеңінде бірнеше түрге бөлінеді.

Жанамалы әсерлі доғамен пісіру. Электрдоғасы екі электрод аралығында (2,4) жалындатылады. Электродтар баяу балқитын

материалдардан (графит, вольфрам) жасалған, олар балқытылмайды. Сондықтан бұларды балқымайтын электродтар деп атайды. Электродтар токпен нәрлендіргіштің үйектеріне қосылған. Пісірумен жалғастырылатын бұйым электржелісіне (2.11-сурет) қосылмайды да доғаның жалындауы бұйымға байланысты емес.



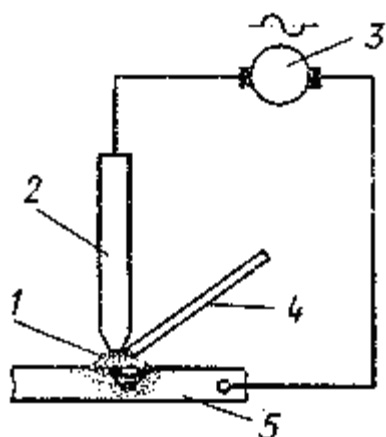
2.11-сурет. Жанамалы әсерлі доғамен пісіру сұлбасы:

1 – электрдоғасы; 2,4 – балқымайтын электродтар; 3 – токпен нәрлендіргіш;
5 – қосымша металл; 6 – бұйым

Доғаның бұйымға әсері тікелей емес, жанамалы. Доға аумағында қыздырылған газдар бұйым үстіңгі бетімен тоғысып оны балқу температурасына дейін қыздырады. Пісіруді жік қалыптастыру үшін қосымша металл 6 пайдаланып та, пайдаланбай да жүргізуге болады. Жанамалы әсерлі доғамен пісіру сирек қолданылады.

Электрдоғасымен пісірудің кең тараған түрі – тура әсерлі доғамен пісіру болып табылады. Мұнда токпен нәрлендіргіштің бір үйегіне бұйым, екінші үйегіне электрод қосылыстырылады. Бұйым – ток келтіруші электродтардың біреуі. Электрдоғасы екі электрод аралығында, яғни электрод пен жалғастыратын бұйым аралығында жалындатылады. Тура әсерлі доғамен пісіру балқымайтын электродпен де, балқымалы электродпен де жүргізіледі.

Балқымайтын электродпен пісіруде (2.12-сурет) бұйым 5 электрлідоға желісіне жалғасқан, доғаның бір үйегі болып табылады. Доғаның екінші үйегі балқымайтын электрод 2-де (көмір, графит, вольфрам) болып келеді. Доға жылулығы әсерімен пісіруге жататын бұйым, кей жағдайларда қосымша металда 4 балқытылады.



2.12-сурет. Балқымайтын электродпен тура әсерлі доғамен пісіру сұлбасы:

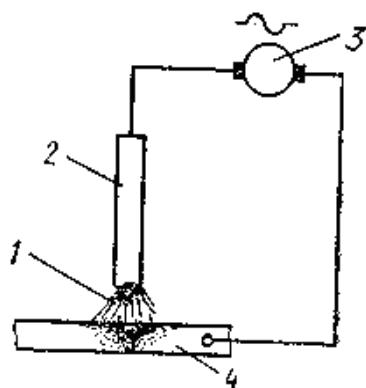
1 – электрлідоға; 2 – балқымайтын электрод;
3 – токпен нәрлендіргіш; 4 – қосымша металл;
5 – металл

Электр тогымен нәрлендіргіштен алынған қуат бірдей болған жағдайда тура әсерлі доғамен пісіруде нәтижелік жоғары, жанамалы әсерлі доғамен пісірумен салыстырғанда.

Балқымайтын электродпен тура әсерлі доғамен пісіру қазіргі уақытта кең тараған тәсіл.

Балқымалы электродпен пісіру сұлбасы 2.13-суретте келтірілді. Мұнда балқымайтын электродпен пісірудегідей бұйым 4 электр тогымен нәрлендіргішке жалғастырылған, электрдоғасының бір үйегі. Электрод 2 балқымалы металл, ол доға жылулығы әсерімен қарқынды балқуда болады да, пісіру ваннасына балқытылған металл келтіреді.

Алдыңғы қаралған пісіру түрлерімен салыстырғанда балқымалы электродпен пісіру тиімділігі елеулі жоғары. Пісірудің бұл түрі – өнеркәсіпте, металл құрылымдар өндіруде, жөндеу жұмыстарында кең қолдану тапқан.



2.13-сурет. Балқымалы электродпен пісіру сұлбасы:

1 – электрдоға; 2 – электрод; 3 – токпен нәрлендіргіш; 4 – бұйым (металл)

Балқымалы электродпен пісіру бірнеше түрі орындалады:

а) ашық электрлідоғамен – пісіру аумағы бақылауға ашық, мұнда оқшаулаушы газ немесе флюс қолданылмайды. Пісіру ваннасын ауа

әсерінен қорғау электрод қаптамасы құрамына арнайы қосылатын заттармен (қож қалыптастырушы, газ қалыптастырушы), т.б. іске асырылады. Кейде қаптамалы электродпен пісіруді «жартылай ашық» («жартылай жабық») доғамен пісіру деп те атайды;

ә) флюс қабаты астында жалынданған доғамен пісіру – пісіру аумағы ұнтақ түрлі арнайы материал флюспен қымталған. Доға жылулығы әсерімен флюстің белгілі үлесті бөлігі балқытылып қож қалыптасады, екінші бөлігі балқытылмай пісіру аумағын ауадан оқшаулап тұрады. Доға балқымаған және балқытылған қож қабаты астындағы ауа қуысында жалындайды да атмосфера әсерінен оқшауланған жағдайда болады. Пісіру процесі механизацияланған – автоматты немесе жартылай автоматты флюс қабаты астында пісіру болып аталады;

б) оқшаулаушы газды ортада жалынданған электрлі доғамен – пісіру аумағына артық қысымды газ ағыны келтіріліп ауадан оқшаулап пісіру процесі жүргізіледі. Оқшаулаушы газ ретінде инертті газдар аргон, гелий және олардың араласы; көмірқышқыл газы; кейбір металдарды (мыс, алтын, күміс) пісіруде азот қолданылады. Пісірудің бұл түрін оқшаулаушы газбен электрдоғалы пісіру деп атайды.

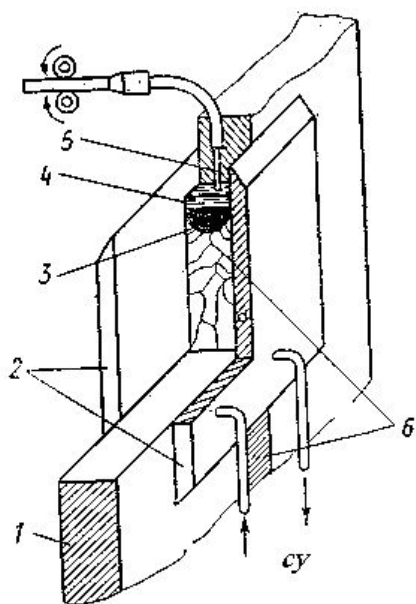
Егер балқымайтын электродтар (графит, вольфрам) аралығында жалындаған жанамалы әсерлі доғаға сутек ағындатылса (2.11-сурет), онда сутек электродтар, балқыған қосымша металл және пісіру ваннасын ауадан оқшаулаумен қатар, доғадан ваннаға (бұйымға) қосымша жылулық береді. Доғаның жоғары температурасында молекулалық сутек атомдарға диссоциаланады. Бұл эндотермиялық процесс $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} - 103800 \text{ кал/моль}$ немесе $540,8 \text{ кДж/моль}$.

Температурасы салыстырмалы төмен аумақта, пісіру ваннасының үстіңгі бетінде, сутек атомдарынан әдетті жағдайда тұрақты сутек молекуласы қалыптасады. Бұл экзотермиялық реакцияда жоғарыда келтірілген шамада жылу бөлінеді. Доғалы пісірудің бұл бір түрін – атом-сутек пісіру деп атайды.

Көміртекті, кейбір легирленген болаттарды пісіру көмірқышқыл газы ортасында жүргізіледі. Көмірқышқыл газы пісіру аумағын ауадан оқшаулайды да ванна металына азот, сутек әсері орын алмайды. Бірақ көмірқышқыл газы белсенді газ. Оттек және көміртектің ванна металымен әсерлесуі орын алады.

Газбен оқшаулап доғалы пісірудің бір түрі бақылаулы атмосферада пісіру. Мұнда пісіру аумағын оқшаулаушы газ ағындалып келтірілмейді. Арнайы бөлмешік алдын ала қажетті газбен, әдетте инертті газбен, толтырылып электрлідоға осы бөлмешікте жалындатылып пісіру процесі жүргізіледі.

Электрқожды пісіру. Токпен нәрлендіргіштің үйектері электрод және пісірілетін бұйымға жалғастырылады. Пісіру флюс қабатының астында өтеді. Мұнда әдеттегі автоматты және жартылай автоматты пісірудегі қолданылатын флюстерден өзгелікті – электр тогын өткізгіштік қабілеті жоғары флюстер қолданылады. Флюс қабаты жеткілікті әдеттегіден мол қалыңдықты етіп алынады. Бастапқыда электрлі доға флюс қабаты астында ауа қуыста жалындайды. Флюс арқылы токтың шунттануы мен флюс қабатының механикалық әсері нәтижесінде доға аумағында ауа қуыс балқыған металл және флюспен толтырылып доға сөнеді. Электр тогы электрод 5-тен пісірілетін бұйым 1-ге (екінші электродқа) өтеді, балқытылған қождың 4 электрөткізгіштігінің нәтижесінде. Балқыған қожда электр тогы өтуі нәтижесінде бөлінген жылу әсерімен электрод 5 балқиды, сондай-ақ пісірілетін бұйым жиектері балқиды. Нәтижесінде балқыған металл ванна 3 қалыптасады. Әдетте пісіру тік бағытта төменнен жоғары бағытта жүргізіледі. Балқыған қожбен металл бейтарап ағындалмауы және жікті дұрыс қалыптастыру үшін, арнайы қалыптастырушы құрылғы 2 қолданылады, ол мыстан жасалып ағымды сумен үздіксіз салқындатылады. 2.14-суретте электрқожды пісіру сұлбасы келтіріледі.

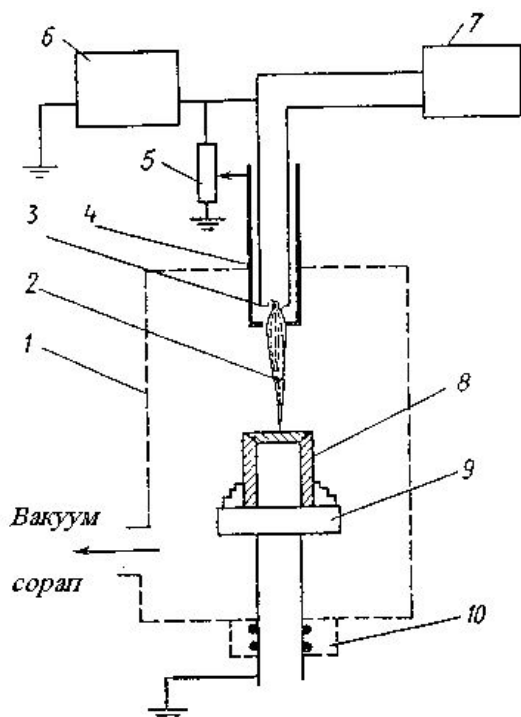


2.14-сурет. Электрқожды пісіру сұлбасы:
1 – пісірілетін бұйым (электрод); 2 – жікті қалыптастырушы жылжымалы құрылғы;
3 – балқыған металл ванна; 4 – балқыған флюс қабаты; 5 – электрод сым немесе тілім;
6 – пісірілген жік

Қалыптастырушы құрылғы пісіру жылдамдығына сәйкесті жылдамдықпен механикалық тәсілмен пісірілетін бұйым бетімен (оған тығыз жанасып) жоғары бағытта жылжуда болады. Кристалдану нәтижесінде (жылу көзінің жоғары бағытта жылжуы әсерімен) пісірілген жік 6 қалыптасады.

Пісірудің бұл тәсілі жоғары қалыңдықты металдарды пісіруде өте тиімді қолданылады және металл қалыңдығы бір ретті пісірумен толық қамтылады.

Электронсәулелі пісіру. Бұйымда пісіруге қажетті жылулық шоғырланған электрондар ағынының 2 бұйымның үстіңгі бетінде соқтығып металда тежелуі нәтижесінде пайда болады. Пісіру арнайы вакуум камерада 1 өтеді мұнда қысым шамасы 10^{-1} – 10^{-5} мм сынап бағанасы ($1,3$ – $0,0013$ Н/м²) болып келеді. Электрон сәуле 4, электрондар ағынын туындататын арнайы құрылғыда – электрондық зеңбіректе қалыптастырылады. Құрылғыда трансформатор арқылы қыздырылатын катод (иммиттер) 3 бар. Электрон зеңбірек жоғары вольтты кернеу түзеткіш 6-дан нәрлендіріледі, ол реостат 5-пен реттеледі. Электрон сәулелі пісіру сұлбасы 2.15-суретте келтірілді.



2.15-сурет. Электрон сәулелі пісіру сұлбасы:

- 1 – вакуум камера; 2 – шоғырланған электрон ағыны; 3 – катод (иммиттер);
- 4 – арнайы электрон зеңбірек; 5 – реостат;
- 6 – жоғары вольттік кернеу түзеткіші;
- 7 – трансформатор; 8 – пісірілетін бұйым;
- 9 – жылжытылмалы пісіру столы;
- 10 – пісіру столының жетегі

Шоғырланған электрондар ағынын тоғыстау электромагнит өрістері әсерімен құрылғының арнайы қондырғылары арқылы жүргізіледі. Бұйым 8 пісіру столына 9 орнықтырылады. Пісіру бағыты мен жік ұзындығы жетек 10 арқылы столды жылжытумен іске асырылады.

Лазерлі пісіру. Оптикалық кванттық генераторлар жасалған соң когерентті сәуле, яғни лазермен айрықша сипатты қалыптасқан сәуле, энергиясын пісіру процесінде қолдану мүмкін болды. Үздіксіз сәуле шығаратын қондырғылар бар. Үйектелген шоғырлы сәуле бұйым бетінде жоғары тығыздықты энергия бөледі. Бұл энергия аса баяу балқитын металл және қосындыларды балқыту және буландыруға жеткілікті болып келеді. Сәуле қуатын реттеу арқылы металды жергілікті балқытып пісіру және үздіксіз жік салып пісіру; үстіңгі бетке балқытып, білікше қаптастыру процестерін жүргізетін қондырғылар бар.

III. ПІСІРУДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ КӨЗДЕРІ

Пісіру операциясында материалды (бұйымды) пісіру температура-сына дейін жергілікті яғни пісіру жүргізілетін аумақты ғана қыздыру қолдану басымды орын алады. Температура шамасы пісірілетін материал қасиеттеріне және пісіру түріне тәуелді анықталады. Балқытып пісіру түрлерінде пісіру жігі қалыптасатын аумақ балқу температурасынан жоғары температураға қыздырылады. Қысым қолданып пісіру түрлерінде пісіру температурасы пластикалық де-формациялау мүмкіндігі және диффузия жылдамдығының жеткілікті болуы шарттарынан анықталады. Жалпы алғанда балқытып пісіруде металды қыздыру температурасы T_m металдың балқу температура-сынан $T_{бл}$ жоғары болуы, яғни $T_m > T_{бл}$, қысыммен пісіруде $T_{бл} > T_m > T_1$ болуы шарт, мұндағы T_1 -белгілі жағдайларда техникалық талаптарға сәйкесті пісірілген жалғас қалыптасуына қажетті (қамтамасыз ететін) температураның минимальды шамасы. T_m , T_1 шамалары пісірілетін материалдар қасиеттеріне тәуелді.

Жылуды максимальды нәтижелі пайдалану үшін пісіру операциясын жүргізуде жылуды бұйым бетіне максимальды шоғырландырып келтіру шарт. Пісірілетін материал тек минимальды қажетті көлемде пісіру процесі өтуіне қажет шамада қыздырылған күйге келтірілуі шарт.

Пісіру процесінде әртүрлі энергияның жылулыққа ауысуын пайдалануға болады. Кең қолдану тапқаны химиялық энергияның (экзотермиялық реакциялар жылулығы), электр, механикалық энергия-лар және оларды құрастырып қолданудағы жылулық энергиясы.

3.1. Химиялық энергия. Газ жалынымен пісіру (газбен пісіру)

Химиялық энергияның жылуға тиімді ауысуы қарқынды өткен экзотермиялық химиялық реакцияларда орын алады. Техникалық икемді және жергілікті қыздыруда газ күйіндегі заттардың жану процесі, әсіресе жану оттек ортасында өткенде жоғары нәтижелі. Пісіру процесінде әртүрлі жанар газдардың оттекте жануында қалыптасқан жылулық кең қолданылады да пісірудің бұл түрі газбен пісіру болып аталады.

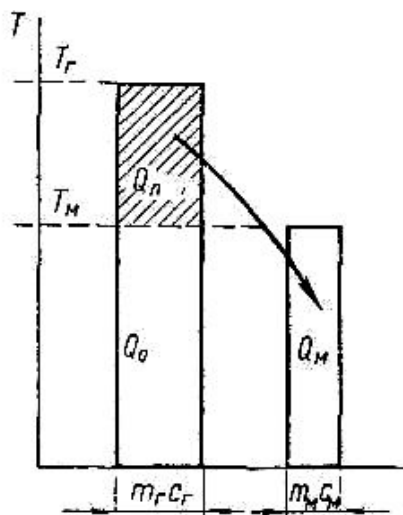
Газбен балқытып пісіру жағдайында химиялық энергиядан алынған жылу энергиясы пісірілетін металдан тыс аумақта бөлінеді. Сондықтан бұйымға жылу келтірілуі өзінше қосымша процесс. Энергия пайдалану тұрғысынан қарағанда бұл тиімсіз жағдай. Пісірілетін бұйымды қыздыруда, басқа процестер тәрізді, жалынның жылу энергиясы толық пайдалынбайды. Жалынның пайдалы әсер коэффициенті пайдалы қолданылған жылу шамасының $Q_{\text{пай}}$ жалынның қарышталған жалпы жылу энергиясына $Q_{\text{жал}}$ қатынасына тең, яғни

$$\eta = Q_{\text{пай}} / Q_{\text{жал}} \quad (3.1)$$

Жылу ысырапталуының бір құрамы пайдалы әсер термиялық коэффициентімен η_t анықталады.

Егер, металдың минимальды қажеттілікті көлемін пісіру температурасына дейін ($Q_{\text{бол}}$), қыздыруға пайдаланылған жылулықты Q_m деп алсақ, жалынның қарышталған жылу қуатын Q_g деп белгілесек, онда термиялық пайдалы әсер коэффициенті тең болады:

$$\eta_o = \frac{Q_m}{Q_g} \quad (3.2)$$



3.1-сурет. Газбен пісіруде жылу пайдалану нобайы

Денені белгілі бір температураға қыздыруға қажетті жылулық дененің массасына, жылу сыйымдылығына және температураға пропорционал екені белгілі. Демек, $Q = mcT$. Осыған сәйкесті, металға тән шамаларды индекс m , газға тән шамаларды индекс g мен таңбалап төменде келтірілген теңдеуді аламыз:

$$\eta_0 = \frac{m_m c_m T_m}{(m_A c_A T_A)} \quad (3.3)$$

Қарапайымдатылған графикалық сипаттауда (3.1-сурет) пайдалы қолданылған және жалпы жылу шамалары негізі $m_x c_x$ биіктігі T_x тікбұрыштармен сипатталады. Жылу жоғары деңгейлі қыздырылған денеден төмен деңгейлі қыздырылған денеге өздігінен тарайтын болғандықтан металды T_m температураға қыздыру үшін жалын жылу қуатының суретте сызықталған Q_{Π} бөлігі ғана пайдалынады. Қалған бөлігі Q_o ауаға тараған газдармен кетеді. Ауаға тараған газдардың температурасын (T_o) металдың үстіңгі бет температурасына (T_m) тең деп алайық. Яғни $T_m = T_o$. Сонда

$$\eta_T = \frac{Q_m}{Q_A} = \frac{Q_A - Q_o}{Q_A} = \frac{m_A c_A T_A - m_m c_m T_m}{m_A c_A T_A} \left(1 - \frac{T_m}{T_A} \right) \quad (3.4)$$

Формула (3.4)-тен көрінетіндей пайдалынылған үлесті жылу шамасы металдың қажетті қыздыру температурасы T_m неғұрлым төмен болса және газ жалыны температурасы неғұрлым жоғары болса, соғұрлым мол болып келеді. Келтірілген тұжырымдауда жылусыйымдылықтың температураға тәуелділігі ескертілмеді және T_o мен T_m температуралы тең деп алынды. Бірінші ескерілмеу есептеуде 15% шамасында қателік беруі мүмкін. Екінші мүмкіндікте $T_o - T_m = (300 \div 400)^\circ\text{C}$ шамасында. Процестің сапалық сипаттамасы аталған ауытқуларда сақталады.

Термиялық пайдалы әсер коэффициенті η_T процестің теориялық мүмкіндікті өтуін сипаттайды. Жоғарыда келтірілген түзетулер пісіру жағдайында жылу таралу процесімен анықталады және жылу таралу пайдалы әсер коэффициенттерімен η_p сипатталады. Жылулықты нақтылы пайдалану коэффициенті η_f аталған екі коэффициенттің көбейтіндісіне тең, яғни

$$\eta_f = \eta_T \cdot \eta_p = 1 - (T_o / T_A) \quad (3.5)$$

Металды пісіру температурасына дейін қыздыруға жарамды минимальды жалын температурасы (3.5) теңдеуден $\eta_f = 0$ ге сәйкес

есептеледі. Эксперименталдық өлшеулермен анықталғандай ауаға таралатын газдар температурасы металл үстіңгі беті температура-сынан $(300 \div 400)^\circ\text{C}$ -қа жоғары, ал металл үстіңгі бетін балқыту үшін қыздырылу балқу температурасынан $(75 \div 100)^\circ\text{C}$ -қа жоғары болуы керек.

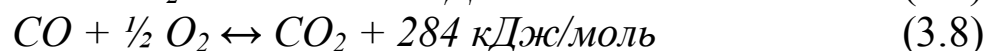
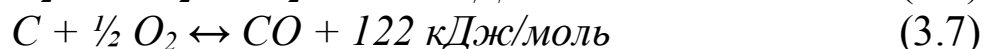
Төменкөміртекті болаттарға қатынасты балқытып пісіру үшін жалынның минимальды температурасы:

$$T_r = T_{\text{бл}} + (75 \div 100) + (300 \div 400) \cong 1950^\circ\text{C} (2273 \text{ K}).$$

Жылу көзінің (газ жалынының) температурасы металды пісіруге қажетті ($T_{\text{бл}}$) температурадан елеулі жоғары болуы шарт. Жылу көзінің температурасы неғұрлым жоғары болса, соғұрлым металды қыздыру нәтижелілігі жоғары және жылулық ысырапталуы төмен болады.

Металдың жылу өткізгіштігіне сәйкесті жылу бұйымға таралуда болады. Сондықтан жергілікті қыздыру жоғары қарқынды және шоғырланған болуы үшін жалынның жылулық қуаты жоғары болуы шарт.

Пісіру процесінде газ жалыны. Пісіруде қолданылатын газ жалыны жанаргазбен оттек араласып, мұны жанараралас деп атайды, жалындату нәтижесінде қалыптасады. Жанар газдардың басым көпшілігі – көміртек пен сутек химиялық қосындысы болып келеді (кейде сутек таза түрінде қолданылады). Жалпы алғанда көмірсутек газдардың жануы төменде келтірілген үш теңдеумен сипатталады:



Бұлар қайталымды экзотермиялық реакциялар нәтижесінде реакция өнімдері белгілі шамалы температураға қыздырылады. Жалын температурасы төменде келтірілген формуламен анықталады.

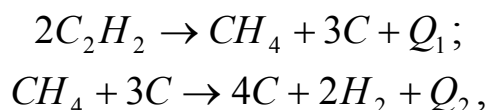
$$T_r = \sum Q / \sum mc, \quad (3.9)$$

мұндағы $\sum Q$ – реакциялардың жинақты жылу эффекті;

$\sum mc$ – реакция өнімдері массасының жылусыйымдылығына көбейтіндісі.

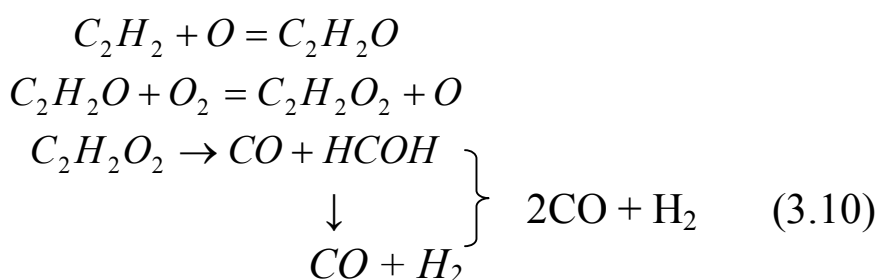
Жоғары температурада реакция өнімдері арасында ыдырау – диссоциялану орын алады және бұл эндотермиялық процесс. Сондықтан нақтылы температура (3.9) формуламен есептелген шамадан төмен болуы мүмкін. Диссоциялану дәрежесі жоғарылаған сайын молекулалардың ыдырауына қарышталатын жылулық шамасы өседі, реакция өнімдері температурасы төмендейді.

Көмірсутектілер жануында жанаргаз тізбекті химиялық өзгерістерден өтеді. Шектелмеген көмірсутектер оттекті ортада қыздырылғанда шектелген көмірсутектерге және көміртекке жіктеледі. Шектелген көмірсутектер көміртек пен сутекке жіктеледі. Ацетиленнің ыдырау сұлбасы жалпы алғанда төменде келтірілгендей өтеді.

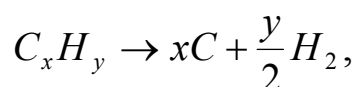


мұнда елеулі шамалы жылулық бөлінеді. Ацетилен ыдырауында жылу эффекті $225,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$.

Оттек болған жағдайда ацетилен ыдырауы тотықтану реакциясымен ұштасып өтеді, яғни пирогенді ыдырау процесі өтеді. Мұнда жоғарыда келтірілгенге қосымша жылулық бөлінеді. Оттекті ортада ацетиленнің ыдырауы төменде келтірілген формуламен көрсетіледі:



Бұл жағдайда бірен-сарандап көмірсутектердің ыдырауы, элементарлық көмір қалыптасуы орын алады.



Кейіннен көмірсутекпен сутек тотығады.

Көмірсутектердің ыдырауы жалын температурасын көтереді. Ең жоғары жалын температурасы неғұрлым шектелмеген көмірсутектілер жануында орын алады, бұлардың көміртек және сутекке ыдыраудағы жылу эффекті жоғары. 3.1-кестеде жанаргаздардың салыстырмалы сипаттамасы келтірілді.

3.1-кесте

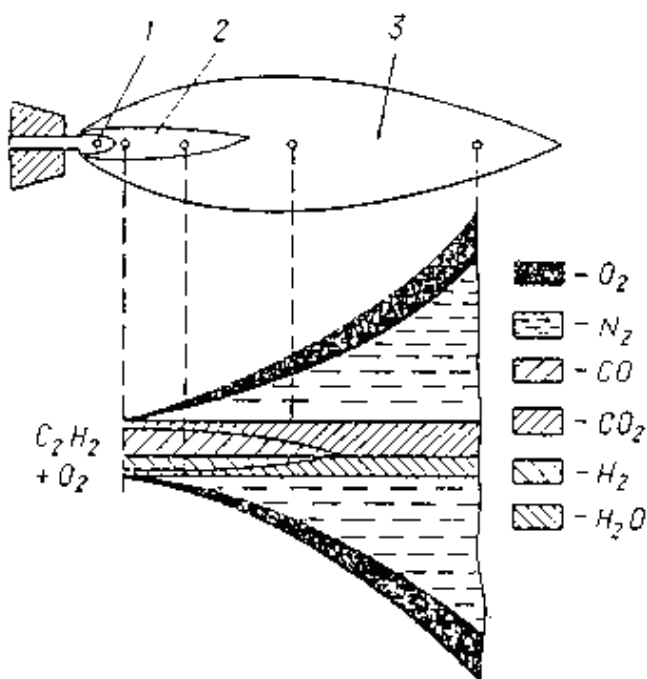
Жанаргаздардың сипаттамасы

Химиялық формула	H_2	CH_4	C_2H_4	C_6H_{12}	C_6H_6	C_2H_2
Техникалық өнім аталуы	Сутек	Метан	Этилен	Бензин (орташа құрамы)	Бензол	Ацетилен
Жану жылулығы Дж/м ³	10730	35900	62600	-	-	58600
Дж/кг	120000	54400	50200	46000	35900	50200
Ауамен аралас жануында жалынның максимальды температурасы, °C	1800	-	-	-	-	2600
Оттеkte аралас жануында жалынның максимальды температурасы, °C	2350	2200	2500	2600	2800	3300

Ең жоғары температураны ацетиленмен оттеc араласы, мұны жанар аралас дейді, жалынын береді. Сондықтан ацетилен салыстырмалы баяу балқитын және жылу өткізгіштігі жоғары металл және қорытпаларды пісіруде негізгі жанаргаз болып саналады. Салыстырмалы жеңіл балқитын немесе жылу өткізгіштігі төмен металдарды пісіруде ацетилен орнына пропан-бутан араласы, метан, сутек т.б. жанаргаздар қолданылады.

Ацетилен – оттеc жалынының сырт көрінісі, температуралық сипаттамасы, әр аумаққа тән жалын құрамы жанарараласта газдардың өзара қатынасына тәуелді. Оттеc пен ацетилен газ шілтерінде араласып шілтер арнасынан екеуінің араласы-жанараралас ағын-

датылады. Сырттан келтірілген от көзі әсерімен газ жанарараласы жандырылады. 3.2-суретте ацетилен-оттек жалынының құрылым сұлбасы келтірілді. Суретте көрсетілгендей жалын үш аумақтан тұрады: 1-ядро; 2-орталықты аумақ; 3-алау.



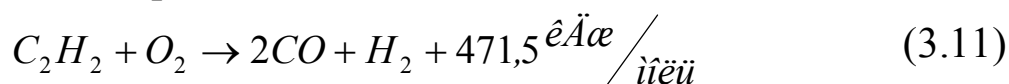
3.2-сурет. Ацетилен-оттек жалынының құрылым сұлбасы:

1 – ядро (жалын ядросы);
2 – орталықты аумақ; 3 – алау

Аталған аумақтардың тұлғасы, көрінісі және салыстырмалы мөлшері оттек шамасының V_0 жанаргаз (ацетилен) V_2 шамасына қатынасына $\beta = V_0 / V_2$ тәуелді, яғни жалын құрамын реттеуге тәуелді, мұны жалынды реттеу деп атайды.

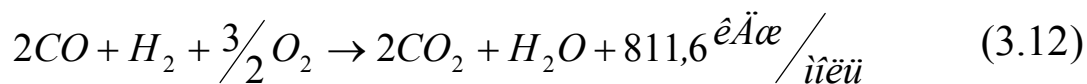
Жану процесі бірнеше кезеңнен өтеді. Бірінші кезең-жанаргаздың жануға бастамалық кезі, бұл жалынның ақ жарық сәулелі аумағы – ядрода өтеді. Мұнда ацетиленнің көміртек және сутек молекуласына ыдырауы орын алады. Элементарлық көміртек бөлшектерінің тотығуы нәтижесінде ядроның ашық жарқыраған сырт нұсқасы айқындалады.

Ядродан тыс екінші аумақ алау ортасында сына тәріздес тұлғалы, ядродай ашық сәулелі емес. Бұл жанудың екінші кезеңі. Бұл жану кезеңінде реакция өнімдері CO және H_2 . Ацетиленнің оттеkte $\beta=1$ жағдайында жануында жанудың екінші аумағында жану реакциясының нәтижелі өнімдері $2CO$ және H_2 .



Ядродан тыс аумақта $\beta=1$ болғанда бос көміртек орын алмайды. Жалынның екінші аумағы ядродан күңгірт, оның жалғасы сипатты сына пішінді, бұл жанудың екінші кезеңіне тән көрініс. Мұнда CO және H_2 ауа оттегімен тотығуы басталады.

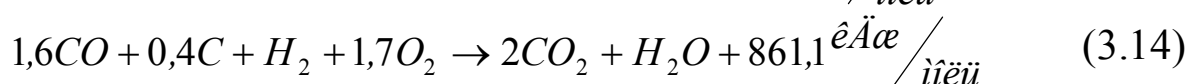
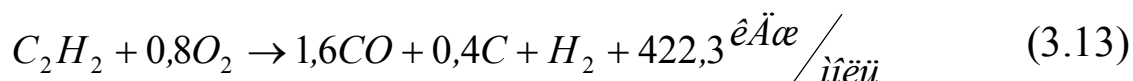
Жанудың үшінші кезеңінде жану алауланып аяқталады. Реакция өнімдері CO_2 және H_2O .



Жалын алауы елеулі мөлшерлі сарғыш-күлгін түсті.

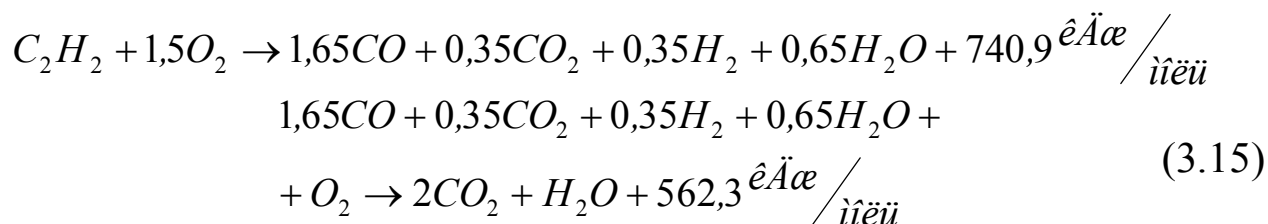
Жалынның ұзындық өсі бойында негізгі газдар құрамы 3.2-суретте келтірілді. Ұзындық өсі бойында жалын қимасында газдардың жинақты шамасы 100 %. Есептеудің негізі ретінде бастапқы жанараралас құрамы және олардың ыдырау және жану өнімдері (CO , CO_2 , H_2 , H_2O) алынды. Ұзындығын бойлай жалынның салыстырмалы кеңеюі анық көлемінің қоршаған ауадан қосылған оттегі, азотпен өсуіне байланысты.

Коэффициент $\beta < 1$ болғанда көміртек толығымен ядро үстіңгі бетінде тотықпайды, кейбір элементарлық көміртек бөлшектері жалынның екінші аумағында ауа оттегінен (мұны екінші оттегі дейді) жанады. Егер осындай жалынның екінші аумағы көміртекті ерітінділетін металмен әсерлессе, метал көміртекке қанығуы мүмкін. Сондықтан мұндай жалынды көміртектендіруші жалын деп атайды. Ацетилен артық жалынның екінші аумағы ақшыл реңді жиегі күңгірт тұлғасы кездейсоқты көмкермелі болып келеді. Алау мөлшері нормалды реттеуден, яғни $\beta = 1$ жалын алауынан көлемді болады. Жалын түсінде сары түстілік артады. Жалында өтетін ($\beta < 0,8$) негізгі реакциялар төменде келтіріледі:



Оттегі артық болғанда $\beta > 1$ жалында ядро мөлшері кішірейеді, ұшы сүйірленеді, конус пішінді болады. Екінші аумақта CO_2 және H_2O шамалары өседі. Алау мөлшері кемиді. Алау реңінде көк түстілік басымдылықты болады. Оттегі артық жалынды тотықтандырушы жалын дейді.

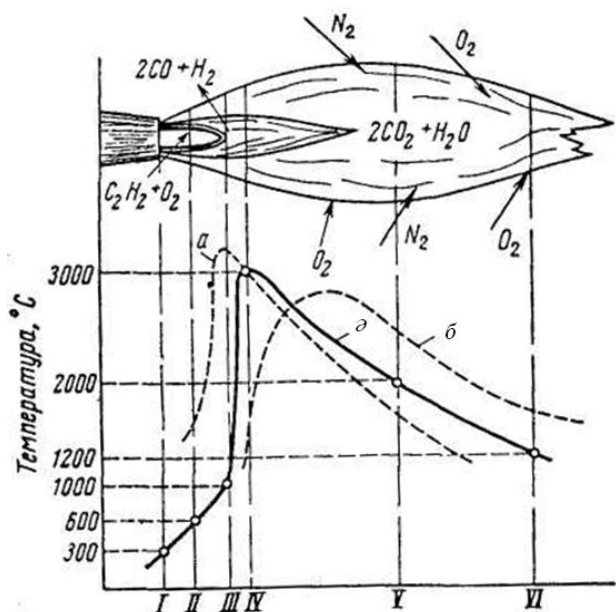
Тотықтандырушы жалында ($\beta > 1,5$) өрбитін реакциялар:



Бұл реакциялар жалын аумақтарында артық ауа болуы мен және аралық химиялық қосынды атомдар болуымен ($ОН$, $Н$ т.б.) күрделенеді.

Жоғарыда айтылғандарға сәйкесті ацетилен-оттекті жалынды оның сырт көрінісіне қарап реттеу қолданылады.

Жалында температураның таралуы реакциялардың жылулық эффектімен және қыздырылған газ көлемімен анықталады. Жалын құрамын әртүрлі реттеуде жалын ұзындығында температура таралуының сипаттамасы 3.3-суретте келтірілді.



3.3 – сурет. Ацетилен-оттек жалынында температура таралуының сипаттамасы:
а – тотықтырушы жалын температурасы; *ә* – нормалды қалыпты жалын;
б – ацетилен артық жалын

Жалынның өсінен шетіне қарай да температура өзгеруде болады.

Пісіру газжалынның жылулық қуаты – уақыт бірлігінде жанатын жанаргаз мөлшерімен реттеледі. Әдетте газ мөлшері ауыстырмалы үштіктермен реттеледі, бұлардың газ ағындайтын арнасының көлденең қимасының ауданы ацетилен, оттек, олардың араласы үшін әртүрлі. Әдетте қолданылатын шілтелердің ауыстырмалы үштіктері ацетилен-оттек жалынның қуатын сағатына 30-дан 3000 дм³ ацетилен қарышталуы аралығында реттейді.

Көмірсутектілердің жану заңдылықтары ортақ жоғарыда сипатталғандай. Сутек-оттек жалынның

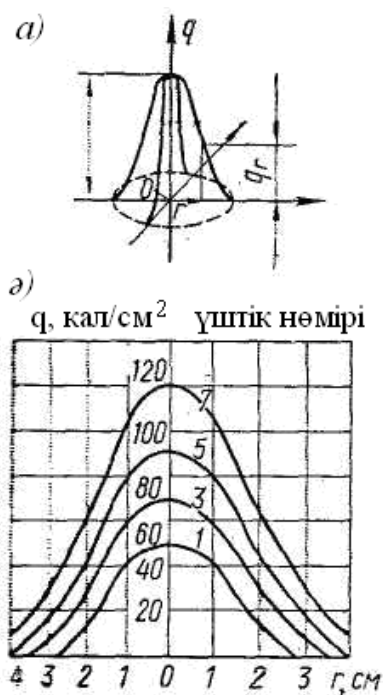
ядросы болмайды және мұнда жалынды сырт көрінісіне қарай реттеу өте қиын.

Газжалынымен металды пісіруде жоғары температуралы газ металл үстіңгі бетімен шағын ауданда түйіседі – бұл ауданды қыздырудағы деп атайды. Қыздырудағында жылулық келтірілуінің қарқындылығы бірдей емес. Жылулық ағыны тығыздығы қыздырудағының ортасында ең жоғары, дақ шетіне қарай жылу ағынының тығыздығы төмендейді. Н.Н. Рыкалин көрсеткендей пісірілетін бұйымға келтірілген жылу ағыны бұйым бетіне перпендикулярлы бағыт-

талғанда жылу ағыны қарқындылығының орталықтан шетке қарай өзгеруі белгілі дәрежелі дәлдікпен математикалық қалыпты таралу заңымен анықталады. Жылу ағынының тығыздығы дақ орталығы радиусы r қашықтықтағы шеңбер нүктелері аралығында өзгеруі төмендегі теңдеумен анықталады.

$$q_r = q_{\max} \cdot e^{-\varepsilon r^2} \quad (3.16)$$

мұндағы $q_{\max}$ – қыздырудағы ортасына келетін жылулық ағынының тығыздығы, кал/(см² · с); q_r – орталықтан r қашықтықтағы жылулық ағынының тығыздығы; κ – жылулық келтіруінің шоғырлану коэффициенті, жалын мөлшеріне және жылу бөлінудің таралуына тәуелді.



3.4-сурет. Пісіруде газжалыны жылулық ағынының тығыздығы:

a – жылулық ағыны тығыздығының математикалық қалыпты таралу заңына сәйкесті графикалық көрінісі;

ә – шілтер үштігі нөміріне сәйкесті жылулық ағынының таралу тығыздығы [$q = f(r)$ жазық қимасы]

Келтірілген (3.16) теңдеуге сәйкес жылу таралуының графикалық сипаты және шілтер үштігінің нөміріне сәйкесті пісіру жалынының жылулық қарқындылығы 3.4-суретте келтірілді.

Ацетилен-оттек жалыны мен қыздыру дағына жылулық келтірудің негізгі сипаттамалық көрсеткіштері 3.2-кесте де келтірілді. Теңдеудегі κ -коэффициенті жылулық келтірілуінің шоғырлануы (κ , 1/см²) боп аталады. 3.2-кестеден көрінетіндей жалын қуатының өсуі шоғырлану коэффициентінің өсуіне алып келмейді. Жалын қуатының өсуі газ

қарышталуының өсуіне байланысты жалын мөлшерінің өсуіне алып келеді. Сәйкесті шоғырлау коэффициенті төмендейді.

3.2-кесте

Ацетилен-оттек жалынымен қыздыру дағына жылулық келтіру сипаттамасы

Шілтер үштігі нөмірі	Ацетилен қарышталуы V_a , дм ³ /сағ	Металға жылу келтірудің жалпы нәтижелігі, q_n , кал/с	Нәтижелі п.э.к q_n/q , %	Дақ орталығында жылу ағынының максимальды тығыздығы q_{max} кал/(см ² с).	Жылу келтірілуінің шоғырлану коэффициенті k , 1/см ²
1	150	380	72	47	0,39
2	250	600	68	67	0,35
3	400	720	51	72	0,31
4	600	920	44	82	0,28
5	1000	1270	36	93	0,23
6	1700	1750	29	111	0,20
7	2600	2250	25	122	0,17

Жалындағы жоғары температуралы және жоғары жылдамдықты газдар металл бетіне жылулық әсерімен қатар механикалықта әсер етеді. Негізгі ағын жалынның ұзындық өсіне келетіндіктен ағын жылдамдығы орталықта жоғары, ал шетке қарай жылдамдық төмендейді. Үстіңгі бет элементарлық ауданына келетін газ ағыны қысымы шамасын төмендегі формуламен анықтауға болады:

$$\Delta p = U^2 / (2gG), \quad (3.17)$$

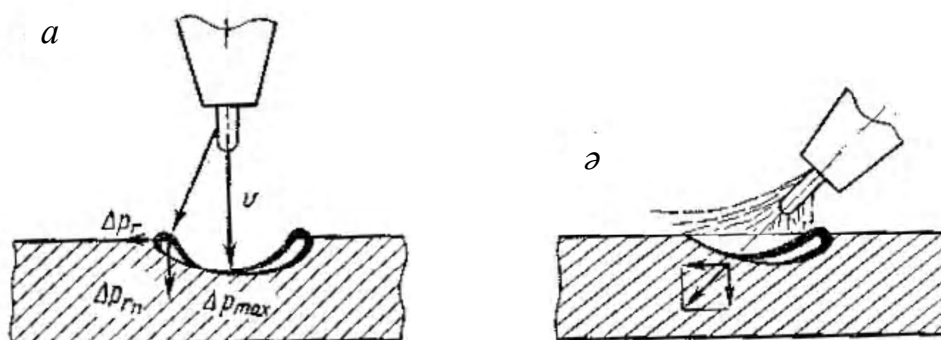
мұндағы U – газ ағыны жылдамдығы, см/с;

G – газдың үлесті көлемі (тығыздыққа кері шама), см³/г;

g – салмақ күшінің үдеуі (981см/с²).

Өртүрлі жылдамдықпен ағындалған газдар ағынның жинақты әсерімен жалын астындағы балқытылған металл үрленіп ығыстырылады. Балқыған металды ығыстыру қарқыны орталықта жоғары,

шетте бәсеңдеген болып келеді. Жалынның пісіру ваннасы металына механикалық әсері 3.5-суретте келтірілді.



3.5-сурет. Газбен пісіруде жалынның балқытылған металға механикалық әсері:

а – жалын металл бетіне тік бағытталған;

ә – жалын металл бетіне еңкішті (көлбеу) бағытталған

Шілтер металл бетіне перпендикулярдан ауытқыған, еңкіштелген жағдайда, жылу ағыны және оның механикалық әсері сипаттамасы өзгереді. Сәйкесті балқытылған металдың үрленіп ығыстырылу сипаты да өзгереді (3.5 ә- сурет).

Ацетилен-оттекті және ацетилен орнына қолданылатын газ пісіру жалыны технологиялық икемді жылу көзі. Жалын жылулық қуатын да, жалынның металға химиялық әсерінде кең ауқымды шекте реттеу мүмкіндігі бар.

3.2. Электрлідоға

Пісіру процесінде ең жиі қолданылатын жылулық көзінің бірі электрлідоға – бұл токпен нәрлендіргішке жалғастырылған екі электрод аралығында газдар (ауа) арқылы тиянақты өтетін электрлік разряд. Осындай электрлі разрядта ток тығыздығы және температура жоғары болып келеді. Электродтар жалғастырылған нәрлендіргіштің қуаты және кернеуі жеткілікті шамада болуы керек. Электродтар доғаның үйектері болып аталады. Нәрлендіргіштің теріс үйегіне қосылған электрод – катод, оң үйекке қосылған электрод – анод. Доға айнымалы токпен нәрлендірілгенде электродтардың үйектігі нәрлендіргіш ток жиілігіне сәйкесті ауысумен болады.

Әдеттегі жағдайда ауада газ молекулалары электр бейтарапты. Газ электр тогын өткізуші болуы үшін онда электр зарядты элементарлық бөлшектер – электрондар және иондар, яғни иондаған молекулалар болуы шарт. Иондар – электрондарынан айрылған немесе электрондар қосылған атом, молекулалар. Сәйкесті біріншісінде оң зарядтар артық, екіншісінде теріс зарядтар артық. Үйек аралығындағы кернеу әсерімен электрон және теріс зарядты иондар анодқа қарай қозғалады, оң зарядты иондар катод бағытында қозғалады, нәтижесінде газды орта арқылы белгілі шамалы ток ағыны өтеді, яғни электрлідоғада ток өтеді. Доғада оң зарядты бөлшектер тек газдың иондануы нәтижесінде орын алуы мүмкін. Электрондар доғаға (электрондар аралығындағы газды ортаға) олардың катод бетінен эмиссиялануы (бөлініп ағындалуы) нәтижесінде, доға аумағында газ молекуларының иондануы нәтижесінде қалыптасады.

Электрон массасы өте аз $9,03 \cdot 10^{-28}$ г. Ион массасы молекула массасына жуық, ауытқу өте аз шамалы.

Потенциал айырмашылығы бір вольтқа тең екі нүкте аралығын өткенде электрон энергиясы электрон зарядының кернеу шамасына көбейтіндісіне тең шамаға өзгереді, яғни:

$$eU = 1,59 \cdot 10^{-19} \text{ Вт} \cdot \text{с},$$

$\text{Вт} \cdot \text{с} = 1,59 \cdot 10^{-12}$, эрг. Энергия өзгеруінің бұл өлшемі (жұмыс өлшем бірлігі) электрон – вольт (ЭВ) болып аталады. Газ молекулаларының иондануы олардан электрондарды «айдап» шығару нәтижесінде орын алады. Ол үшін белгілі шамалы жұмыс атқарылуы қажет, бұл қажетті жұмыс иондану жұмысы деп аталады да электрон-вольт өлшемді. Сандық мөлшері иондану потенциалына тең.

Әртүрлі газдар молекуласын иондандыру үшін қажетті энергия шамасы өзгешелікті. 3.3-кестеде әртүрлі элементтерге тән бірінші иондану (В) потенциалы келтірілді.

3.3-кесте

Элементтердің иондану потенциалы

Элемент	Cs	Rb	K	Na	Ca	Fe	C	H	O	N	Ar	He
Иондану потенциалы В	3,88	4,20	4,30	5,11	6,11	7,83	11,22	13,50	13,60	14,50	15,70	24,50

Иондандыру молекулаға әртүрлі әсер ету нәтижесінде орын алады: соғумен (соқтығысумен) иондандыру; сәуле әсерімен иондану (фотоиондандыру); қыздырумен ионизациялау (термиялық иондандыру).

Соқтығысумен иондандыру доға аумағында жоғары жылдамдықты қозғалысты электрондардың салыстырмалы баяу қозғалысты молекуламен соқтығысу нәтижесінде орын алады. Ол үшін электрондардың кинетикалық энергиясы элементтің иондану жұмысынан артық, немесе оған тең болуы шарт:

$$\frac{mV^2}{2} \geq eU, \quad (3.18)$$

мұндағы m – электрон массасы, г;

V – электрон жылдамдығы, см/с;

eU – иондану жұмысы, эрг.

Соқтығысуда молекула иондануы орын алатын электрон минимальды жылдамдығы:

$$V = \sqrt{2eU / m} \quad (3.19)$$

Мысалы, соқтығысуда темір атомын иондандыруға жеткілікті электронның минимальды жылдамдығы:

$$V = \sqrt{2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-12} \cdot 7,83 / (9,03 \cdot 10^{-28})} = 1,66 \cdot 10^8 \text{ см/с} / \tilde{n} = 5970000 \text{ см/с} / \tilde{n} \approx f$$

Сәуле әсерімен иондану (фотоиондандыру) – жұмысы сәулелі энергия кванттарының әсерімен өткеріледі. Иондану өтуі үшін сәулелі энергия квантты әсері иондану жұмысынан артық немесе тең болуы шарт.

$$hv \geq eU \quad (3.20)$$

мұндағы h – Планк тұрақтысы ($6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг·с);

ν – тербеліс жиілігі, 1/с.

Иондандыру үшін газ молекулаларына әсер ететін сәуле жоғары жиілікті толқынды болуы керек. Азотты иондандыру үшін минимальды жиілік шамасы:

$$\nu = \frac{eU}{h} = \frac{1,59 \cdot 10^{-12} \cdot 14,5}{6,62 \cdot 10^{-27}} = 3,53 \cdot 10^{15} \text{ 1/с.}, \text{ бұл сәулелер толқынның}$$

ұзындығы

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{3,53 \cdot 10^{15}} = 0,85 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 850 \text{ Å}$$

Термиялық иондандыру мәні, жоғары температурада элементарлы бөлшектердің соқтығысуы өседі. Жоғары температурада (жылулық) әсерімен 100% иондану ықтималдығы төменде келтірілген формуламен анықталады.

$$(3/2)kT \geq eU, \quad (3.21)$$

мұндағы k – Больцман тұрақтысы ($1,36 \cdot 10^{-16}$ эрг/К); T – газ температурасы, К.
Азоттың 100% иондану температурасы

$$T = \frac{2eU}{3k} = \frac{2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-12} \cdot 14,5}{3 \cdot 1,36 \cdot 10^{-16}} = 113000 \text{ К.}$$

Температура салыстырмалы төмен болғанда иондану толық өтпейді, бірен-сарандап иондану дәрежесі температура мен қысымға тәуелді константамен анықталады. Қысым тұрақты жағдайда, аталған константа төмендегі теңдеумен анықталады:

$$K_p = C_{\text{и}} C_{\text{э}} / C_{\text{а}}, \quad (3.22)$$

мұндағы $C_{\text{и}}$, $C_{\text{э}}$, $C_{\text{а}}$ – сәйкесті ион, электрон, ионданбаған (бейтарап) атомдар концентрациясы.

Доға бағанасын изотермиялық плазма деп қарап белгілі қысым мен температурада иондану дәрежесін жапон ғалымы Сага теңдеуімен анықтауға болады:

$$\frac{x^2}{1-x^2} p = 2,4 \cdot 10^{-4} a^2 T^{5/2} e^{-\frac{eU}{kT}} \quad (3.23)$$

мұндағы p – қысым, мм сынап бағанасы;

U – иондану потенциалы, В;

a^2 – кванттық коэффициент.

Саға теңдеуі қолданылған мүмкінді болжамдарға сәйкесті иондану дәрежесін жуықталған мәнде шешеді және иондану дәрежесі төмен болғанда ақиқатқа жақындығы өседі. Саға теңдеуімен анықталған әртүрлі элементтердің температураға байланысты иондану дәрежесі 6000-7000 К-те жеңіл ионданатын элементтер K , Na , Ba , Ca иондану дәрежесі жоғары болуы мүмкіндікті екенін көрсетеді.

Әдеттегі, ауадағы доғада бірнеше элементтер орындалады. Бұл жағдайда нәтижелі (эффektivті) иондану потенциалы $U_{эф}$ деген түсінік енгізіледі. В.В. Фролов мүмкіндікті болжамдарға сүйеніп нәтижелі иондану потенциалының теңдеуін шығарды.

$$U_{эф} = -\frac{T}{5800} \ln \sum_{i=1}^{i=k} C_i^{1/2} e^{-\frac{5800}{T} U_i} \quad (3.24)$$

мұндағы C_i – i заттың газдық концентрациясы;

U_i – жеке газдың иондану потенциалы.

В.В. Фролов есептеулері көрсеткендей 5800К температурада доға атмосферасына шамалы мөлшерлі жеңіл ионданатын элементтер қосылуы нәтижелі иондану потенциалын елеулі төмендетеді.

Жоғарыда айтылғандай электродтар аралығында ауаның электрлік өткізгіштігі (доға бағасында) катодтан эмиттирленген электрон ағынына тәуелді. Катодтан электрондар ағындалуы термоэлектрондық және автоэлектрондық эмиссия, сондай-ақ катод бетін қозғалысты элементарлық бөлшектермен атқылау нәтижесінде орын алады.

Термоэлектрондық эмиссия мәні – катод беті қыздырылғанда электрондардың кинетикалық энергиясы өседі. Кинетикалық энергиясы электрстатикалық тарту күштерінен басым электрондар дененің үстіңгі бетіндегі потенциалдық кедергіден өтіп атомнан бөлініп шығады. Термоэлектронды эмиссияның ток тығыздығы Ричардсон және Дешман теңдеуімен анықталады:

$$j_0 = AT^2 e^{-\frac{\varphi}{kT}} \quad (3.25)$$

мұндағы j_0 – термоэлектрон эмиссия тогы тығыздығы, А/см²;

φ – электронның бөлініп шығу жұмысы, эВ;

A – коэффициент (пісіруде металл электродтар үшін)

$$A = 60 \div 70 (A / \tilde{n}^2 \cdot \hat{E})$$

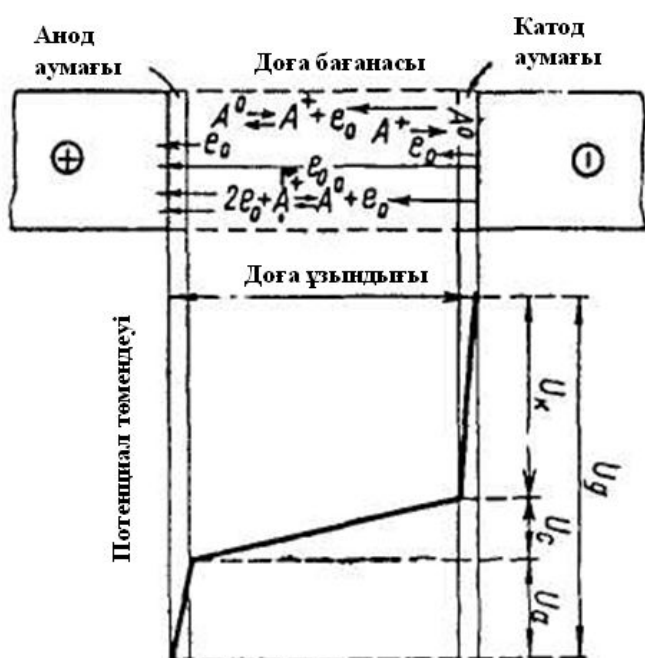
Егер металл үстіңгі бетінде тотықтар болса, онда электрондардың шығу жұмысының шамасы төмендейді, яғни басқа шартты жағдайлар бірдей болғанда электрондар эмиссиясы өседі. Кейбір металдар үшін электрондар шығу жұмысы 3.4-кестеде келтірілді.

3.4-кесте

Металдар атомынан электрон шығу жұмысы

Металл	Электрон шығу жұмысы, эВ		Металл	Электрон шығу жұмысы, эВ	
	Үстіңгі бет таза	Үстіңгі бет тотықты		Үстіңгі бет таза	Үстіңгі бет тотықты
Калий	2,02	0,46	Барий	2,29	1,59
Натрий	2,12	1,8	Темір	4,74	3,92
Кальций	3,34	1,7	Вольфрам	4,54	-

Автоэлектронды эмиссия. Электрондар эмиссиясы сыртқы электр өрісі әсерімен де орын алады. Мұны автоэлектронды эмиссия деп атайды. М.Я. Бродский және Г.А. Погодин-Алексеев көрсеткендей электрдоғалы пісіруде катод аумағында электр өрісінің кернеуі $10^6 \dots 10^7$ В/см шамасында болып келеді. Бұл кернеу шамасы темір және вольфрам электродтардың қайнау температурасында электрондар эмиссиясына жеткілікті.



3.6-сурет. Электрдоғасында кернеу шамасының таралуы

Пісіруде бірен-саран оң зарядты иондар катод бетіне жеткілікті энергия қорымен жетіп соқтығады. Бұл процесте электрдоғасында электрондар ағыны өз үлесін қосады деп ұйғаруға болады. Катодқа сәуле кванттарының әсері де электрондар ағындауына салыстырмалы төмен нәтижелілікті үлесін қосады деп болжамданады (фотоэлектрондық эмиссия). Катодтан электрондар қарқынды эмиссиясы және сәйкесті доға аумағында иондану процестері нәтижесінде электр желісінде кернеу және ток күші белгілі шамалы тиянақты разряд, электрдоғасы қалыптасады.

Электрдоғасында кернеу шамасының төмендеуінің таралуы 3.6-суретте келтірілді.

Электродқа қатысты аумақтарда, бұларды катод аумағы және анод аумағы деп атайды, кернеу шамасының жергілікті төмендеуі және доға бағанасында түзу сызықты кернеу төмендеуі байқалады. Доға кернеуінің қорытынды (жалпы) төмендеуі үш құрамнан тұрады.

$$U_{\bar{a}} = U_{\bar{e}} + U_{\bar{a}.a} + U_{\bar{a}}, \quad (3.26)$$

мұндағы $U_{\bar{a}}, U_{\bar{e}}, U_{\bar{a}.a}, U_{\bar{a}}$ – сәйкесті доға жалпы кернеуі және кернеу төмендеуі: катодтық, доға бағанасында, анодтық. Сондықтан доға қуаты:

$$P_{\bar{a}} = IU_{\bar{a}} = IU_{\bar{e}} + IU_{\bar{a}.a} + IU_{\bar{a}} \quad (3.27)$$

Доғадағы жалпы ток иондар тогынан және электрондар тогынан тұрады.

$$I_f = I_{\bar{e}} + I_{\bar{y}} \quad (3.28)$$

Электрон тогының үлесін $f = I_{\bar{e}} / I$ деп алып, $I_{\bar{e}} = fI$ екенін және иондар тогы $I_n = (1-f)I$ көреміз.

Электрдоғалы пісіруде жылулық сипаттамасының – электродтарды (электрод және пісірілетін металл) қыздыру, балқыту, буландыруға келетін жылулықтар W_k және W_a басты мәні бар.

Радиациялық ысырыпталуды ескермегенде және $U_k = U_n$ деп алып.

$$W_k = I[2(1-f)U_{\bar{e}} - \varphi] \quad (3.29)$$

$$W_a = I(U_a + \varphi) \quad (3.30)$$

Келтірілген теңдеулер әртүрлі факторлардың катод және анод материалдарын қыздыруға, балқыту, буландыруға әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

Катод энергиясы W_k шамасын өсіру үшін иондық токтар үлесін және иондану потенциалын өсіру керек те, электронның шығу жұмысын кеміту керек.

Анод энергиясы W_a өсіру үшін электрон шығу жұмысын өсіру керек және анод аумағы кернеуін U_a өсіру керек.

Балқымалы электродпен пісіруде уақыт бірлік өлшемінде балқытылған электрод металының массасы:

Тура полярлы пісіруде (электрод-катод)

$$g = 0,24W_k / h_{m_M} = 0,24I[2(1-f)U_e + \varphi] / h_{m_M} \quad (3.31)$$

Кері полярлы пісіруде (электрод-анод)

$$g = 0,24W_a / h_{m_M} = 0,24I(U_a + \varphi) / h_{m_M} \quad (3.32)$$

мұндағы g – уақыт бірлігінде балқытылған металл массасы, г/с;

h_{m_M} – балқыған металдың үлесті энтальпиясы кал/г.

Техникалық есептеуде пісіруде электродтың балқуын бағалау үшін электродтың балқу коэффициенті шамасы қолданылады. Аталған коэффициент өлшемі г/(А·сағ), яғни 1А токпен 1сағат уақытта балқыған электрод массасы (г).

$$\alpha_p = g \cdot 3600 / I \quad (3.33)$$

Сонда тура және кері полярлы доғамен пісіруде сәйкесті:

$$\alpha_p = 0,24[2(1-f)U_e - \varphi]3600 / h_{m_M} \quad (3.34)$$

$$\alpha_p = 0,24(U_a + \varphi)3600 / h_{m_M} \quad (3.35)$$

α_p, h_{m_M} мәндерін эксперименталды анықтап (3.34) және (3.35) формулалар арқылы анодта және катодта кернеу төмендеуін, токтың электрондық үлесті шамаларын жуықтап анықтауға болады.

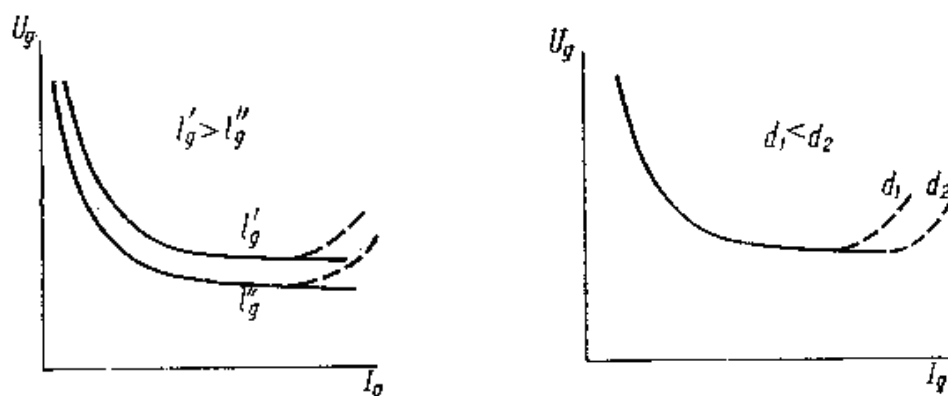
Доға айнымалы токпен нәрлендірілгенде балқымалы электрод катод немесе анод болып кезекті ауысып тұрады. Бұл жағдайда

$$W_{\dot{y}} \approx (W_{\dot{e}} + W_{\dot{a}}) / 2 \quad (3.36)$$

$$\alpha_p \approx 0,24[2(1-f)U_{\dot{e}} + U_a]1800 / h_{m_M} \quad (3.37)$$

Электродтар материалдары нақтылы белгілі, электродтар аралығында газ құрамы тұрақты, доға разрядты тиянақты жалындау жағдайында катод дағында ток күшімен тығыздығы арасында, доға ұзындығы мен кернеуі арасында; электродтар температурасы және доға бағанасы температурасы арасында айқын қатынастылық орын алады. Аталған параметрлердің біреуінің өзгеруі басқа параметрлердің де құбылуына әкеледі.

Доға кернеуі мен тогы арасындағы тәуелділік доғаның статикалық вольтамперлік сипаттамасы болып аталады. Бұл сипаттаманың графикалық көрінісі 3.7-суретте келтірілді.



3.7-сурет. Электрдоғасының вольтамперлік сипаттамасы:

l_g — доға ұзындығы, d — электрод диаметрі

Доға ұзындығы тұрақтылығын сақтап ток шамасы төмен кезеңде доға тогының өсуінде кернеу төмендеуде болады. ВАС ылдиланған көріністі болады. Ток шамасы әрі қарай өсуде болғанда, демек белгілі катод диаметрінде ондағы ток тығыздығының өсуінде, кернеу шамасы тұрақты болады (ВАС түзу сызықты). Бұл жағдайда катод дағының диаметрі ұлғая келе катод шекті диаметріне теңеледі. Әрі қарай катод дағының диаметрінің өсуі шектеледі. Бұл жағдайда ток шамасының өсуінде кернеу шамасы да өседі. Электрод диаметрі ұлғайғанда, басқа

шарттар бірдей болса, вольтамперлік сипаттаманың өрлеу тармағы ток шамасы жоғары болғанда орын алады.

Ток шамасы (тығыздығы) салыстырмалы төмен болғанда доға кернеуі U_d , ток күші I және доға ұзындығы арасындағы тәуелділік Г. Айртон теңдеуімен анықталады:

$$U_d = a + bl_d + (c + dl_d) / I, \quad (3.38)$$

мұндағы a , b , c және d – электрод материалына, электродтар аралығында газ құрамына тәуелді коэффициент.

Ток күші жеткілікті жоғары шамада болғанда теңдеу (3.38) соңғы мүше төмен шамалы болады да, оны ескермеу мүмкін.

Сонда

$$U_g = a + bl_d, \quad (3.39)$$

мұндағы $a = U_k + U_a$. Теңдеу (3.39) тан көрінетіндей доға кернеуінің өсуі доға ұзындығына тура пропорционалды.

Доғаны айнымалы токпен нәрлендіруде электрондардың үйектілігі ауыспалы болатындықтан нөлден өту сәтінде доға сөніп барып қайта жалындайды. Бұл кезеңдерде электрод шеттерінің (үштерінің) және аралықтағы газдардың температуралық күйі өзгеруіне байланысты доғаның қайта жалындауы үшін кернеу оның тұрақталған шамасынан жоғары болуы керек.

Пісіру процесінде доға разрядындағы температура шамасының мәні зор. Доға бағанасының температурасы доға аумағында (электродтар аралығында) иондану дәрежесіне, яғни доғаның ток өткізгіштігіне тәуелді. Басқа шартты жағдайлар бірдей болғанда аралықта иондану дәрежесі газ (ауа) құрамына байланысты. Газ құрамының доға бағанасы температурасына байланысты құбылуы 3.5-кестеде келтірілді.

Болатты пісіруде доға бағанасы температурасына газ құрамы әсері.
3.5-кесте

Ток 280 А (М.Я. Броун зерттеуі)

Газ құрамы	Ауа	Na ₂ CO ₃ буы	K ₂ CO ₃ буы
Температура, К	6100±200	4800±200	4300±100

Нәтижелі (эффективті) иондану потенциалына тәуелді қарастырып, доға бағанасының температурасын анықтаудың қарапайымдатылған жолдары бар. Балқымалы электродпен салыстырмалы төмен тығыздықты токпен ережелі пісіруде доға температурасы К.К. Хренов теңдеуімен анықталады:

$$T_d \approx 800U_{\text{до}} \quad (3.40)$$

Ток тығыздығы жоғары ережеде пісіруде (мысалы, флюс қабаты астында пісіруде және балқымайтын электродпен пісіруде) доға бағанасының температурасы $T_d \approx 1000U_{\text{до}}$.

Доға температурасы ток күші және тығыздығымен қатар доғаның көлденең қимасының ауданына тәуелді. Доға көлденең қимасының ауданына сыртқы факторлар әсер етеді. Ток күші өскен сайын доға температурасы жоғарылайды. Су астында, яғни тереңдікте, пісіруде су қабатының қысымы өскен сайын доға температурасы жоғарылайды, доға аумағының сыртында газ көбіршіктерінің ұлғаюда доға температурасы өсуіне оң әсер етеді. Доға бағанасын әртүрлі тәсілдермен сығымдауда: шілтер құрылымын арнайы өзгертумен; доға шеттерін газ ағынымен салқындату; электромагниттік сығымдау т.б. доға температурасын көтереді.

Аталған тәсілдер қолдану доға плазмасы температурасын шамамен 20000К дейін жоғарылатады.

Пісіруде пайдаланатын жылу энергиясының мөлшері қолданылған пісіру тәсіліне, яғни жылулықты бұйымға келтіру тәсіліне де байланысты. Мысалы, жанамалы әсерлі доғамен пісіруде, мұнда пісірілетін бұйым электржелісіне қосылмаған, сондықтан доға үйегі емес, доға ұзындығы негізінен ауамен толтырылған. Доғаның осылай жанамалы орналасуында пісірілетін бұйым доғада бөлінген жылу қуатының 10–15 % үлесін ғана пайдаланады. Доға арқылы сутек ағыны үрленсе сутек молекуласының диссоциялануы ($H_2 \rightarrow 2H - 541,8 \text{ кДж} / \text{моль}$) және салыстырмалы салқын металл үстіңгі бетінде ассоциациялану нәтижесінде ($2H \rightarrow H_2 + 541,8 \text{ кДж} / \text{моль}$) металлға қосымша жылулық келтіріледі. Мұнда жанамалы доғамен пісіру нәтижелігі елеулі өседі.

Пісірілетін бұйымды электродтардың бірі ретінде жалғастыру электродтар аумағындағы энергия бөлінуі нәтижесінде, энергия мөлшері доға бағанасы энергиясынан басым пайдалынады.

Балқымайтын электродпен пісіруде доға жылулық қуатының металды қыздыруға нәтижелі пайдаланылатын үлесі 50%; кейбір

жағдайда (терең бойлаған доғада) одан едәуір артық. Балқымалы электродпен пісіруде әр электрод (катод, анод) аумағында сәйкесті энергия бөлінеді. Балқытылған электрод тамшылары сәйкесті жылулық мөлшерін бұйымға тасымалдайды. Пісіруге жататын металға келтірілген жалпы жылу қоры доға жылулық қорының 80–90 % үлесін құрайды. Айтылғандар пісіру доғасының нәтижелі (эффекті) жылу қуаты өзгермелі болып табылатынын көрсетеді.

Доғаның нәтижелі жылулық қуаты төменде берілген формуламен анықталады.

$$q_n = Q_d \eta_i = 0,24 K I U_d \eta_i \quad (3.41)$$

мұндағы q_n – доғаның нәтижелі жылулық қуаты, пісіруге жататын бұйымға келтірілген. (Қарапайымдату үшін $q_n = q$ деп белгілейміз), Q_d – доғаның жылулық қуаты; η_i – доғаның нәтижелі қуатының (q_n) толық қуатына қатынасына тең коэффициент; 0,24 – электрлік шамаларды жылулық шамаларға аудару коэффициенті кал/(Вт.с); K – кернеу және ток қисық сызықтарының синусоидадан ауытқуының доға қуатына әсерін ескеру коэффициенті (тұрақты ток қолдануда $K=1$; айнымалы токта $K=0,7-0,97$).

Өртүрлі доғалы пісіруде η_i коэффициентінің мәні 3.6-кестеде келтірілді.

3.6-кесте

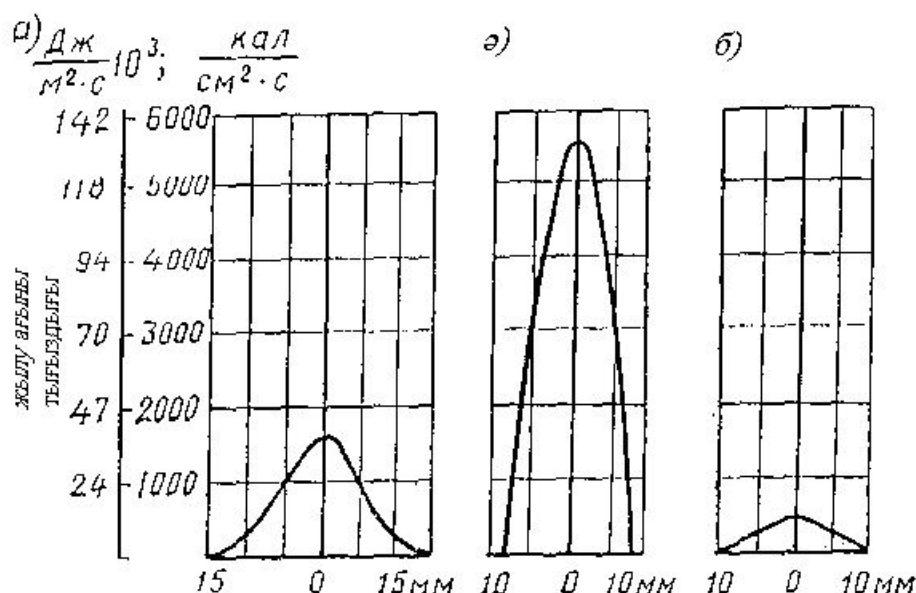
Электрдоғалы пісіруде η_i мәні

Пісіру тәсілі	Балқымайтын электродпен газбен оқшаулап пісіру	Балқымалы электродпен (доғаны тұрақтандырушы қаптамалы)	Қаптамалы балқымалы электродпен	Балқымалы электродпен флюс қабаты астында
η_i	0,45-0,70	0,65-0,75	0,75-0,85	0,75-0,90

Тура әсерлі доғада (қыздырылатын бұйым электр желісіне жалғасқан және доғаның бір үйегі болып табылады) жылулық бұйымға белгілі мөлшерлі ауданда-қыздыру дағында келтіріледі (газ жалынымен пісіруге сәйкесті). Жылулық келтірудің шоғырлану дәрежесі және доға орталығында максимальды үлесті жылулық ағыны газбен пісірудегіден

мол елеулі жоғары. Электрдоғалы пісіруде металға келтірілген жылу таралуы да пісіру тәсіліне орай өзгешелікті, жалпы заңдылық математикалық қалыпты таралуға сәйкесті болғанмен.

Төменде 3.8-суретте доғалы пісіру тәсілдерінде (ұзындық қима) металға келтірілген жылу таралу тәуелділіктері келтірілді.



3.8-сурет. Электрдоғалы пісіруде жылулық таралуы:

- а) – балқымайтын көмір электрод ашық доғалы;
 б) – балқымалы электродпен флюс қабаты астында; в) – төмен шамалы токты балқымалы электродпен, ашық доға

3.7-кестеде электрлі пісіру доғасының жылулық ағыны сипаттамасы келтірілді.

3.7-кесте

Пісіру доғасының жылулық ағыны сипаттамасы

Пісіру доғасының сипаттамасы	Максимальды үлесті жылу ағыны, кал/(см ² ·с)	Шоғырлану коэффициенті формула $q_r = q_{max} \cdot e^{-kr^2}$; к, 1/см ²
Балқымайтын көміртек электродты доға	1000-2000	1-1,5

3.7-кестенің жалғасы

Пісіру доғасының сипаттамасы	Максимальды үлесті жылу ағыны, кал/(см ² ·с)	Шоғырлану коэффициенті формула $q_r = q_{max} \cdot e^{-kr^2}$; к, 1/см ²
Аргон ортасында балқымайтын вольфрам электродты доға	500-600	5-14,0
Балқымалы (темір) электродты ашық доға	1000-2000	1-1,5
Балқымалы (темір) электродты флюс қабаты астындағы доға	6000	6-10,0

Электрлі доға қыздырылған, балқытылған металға механикалық әсер етеді.

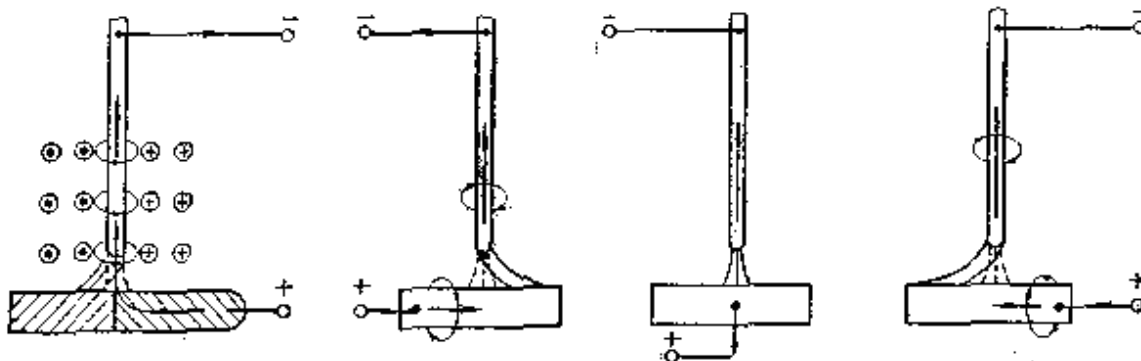
Қандай да болсын ток өткізгіштен ток өткенде өткізгіш аумағында магнит өрісі қалыптасады. Магнит өрісінің электрод ұзындығын бойлаған құрамы заряды бөлшектер ағынын айналдырып қозғалтады – доғаны айналдырады. Балқымалы электродпен пісіруде магнит өрісінің ұзындық құрамы балқыған электрод металының тамшысының электрод ұшынан бөлінуіне және оның пісіру ваннасына тамшылануына елеулі әсер етеді.

Магнит өрісінің көлденең бағытты құрамы доғаны қалыпты бағытынан ауытқытады, мұны доғаны магниттік «үрлеу» деп атайды.

Доға магнит өрісінің магниттік үрлеу әсер сұлбасы 3.9-суретте келтірілді.

Доғаның магнит өрісі пісіру тогының квадратына пропорционалды өседі. Магнит өрісінің доғаны «үрлеу» әсері ұзындығы қысқа доға да бәсең, ұзын доға да күшті болып келеді.

Кейбір жағдайларда доғаның магнитті үрленуіне қарсы арнайы шаралар қолданылады; сыртқы магнит өрісімен доғаны тиянақтандыру; пісіру жігіне жақын аумақта магнитті масса қою; электродты еңкіш ұстау.



3.9-сурет. Электрлі доға бұйымның электржелісіне жалғастыруына сәйкесті магнит өрісінің доға жалындауына әсері

Айнымалы ток доғасының магнитті «үрленуі» тұрақты ток доғасындағыдан нашар. Кей жағдайларда бұл айнымалы токпен пісірудің тиімділігін өсіреді.

3.3. Электртогының жылу қуаты

Электртогы өтуі нәтижесінде өткізгіште жылу бөлініп материал қыздырылады, мұны электртогымен қыздыру деп атайды. Электртогы өтуінде металда бөлінген жылулық қуатын металды пісіруде қолданылады және осылай пісіру тәсілінің бірнеше түрі бар. Мұндағы жалпы шарт пісірілетін бөлшектер пісіру орнында бір-бірімен түйістірілуі шарт. Осыған орай электртогын өткізу арқылы пісіру тәсілдерін жинақты түрде электрлі түйіспелі пісіру деп атайды. Электрлі түйіспелі пісіру машиналарының құрылымы және технологиясы электртогы жылулығы заңдылықтарына негізделген мұнда пісіру процесі қыздыру мен қатар қысым қолданып жүргізіледі.

Металда ток өтуі нәтижесінде бөлінген жылулық Ленц-Джоуль заңымен анықталатыны мәлім.

$$Q = 0,24I^2Rt, \text{ кал} \quad (3.42)$$

$$Q = I^2Rt, \text{ Дж} \quad (3.43)$$

мұндағы I – ток күші, А;

R – желі қарсылығы, Ом;

t – ток өту уақыты, с.

Егер желі де электрқарсылығы әртүрлі учаскелер болса, онда оларда бөлінетін жылулық шамасы қарсылықтарына пропорционалды әрқалай болып келеді. Көлденең қимасы тұтас өткізгіштің қарсылығы

$$R = \rho(l / s), \quad (3.44)$$

ρ – өткізгіштің үлесті қысымы, Ом·см;

l – өткізгіш ұзындығы, см; s – өткізгіш көлденең қимасының ауданы, см².

Пісіру процесінде жиі қолданылатын металдардың үлесті қарсылығы 3.8-кестеде келтірілді.

3.8-кесте

Кейбір металдардың үлесті қарсылығы

Металл	Cu	Al	Mg	W	Zn	Ni	Fe
ρ Ом·см·10 ⁻⁶	1,75	2,72	4,3	5,32	5,95	7,35	9,9

Температура жоғарылағанда металдардың қарсылығы өседі. Бұл тәуелділік төменде келтірілген теңдеумен сипатталады.

$$R_T = R_0(1 + \alpha T), \quad (3.45)$$

мұндағы R_T – металдың температура T -ға сәйкесті қарсылығы, Ом;

R_0 – бастапқы қарсылығы;

α – электрлі қарсылықтың температуралық коэффициенті.

Қыздыруда кристалл торы өзгертін металда α шамасы кристалл торы өзгешілігіне сәйкесті өзгереді.

Металл құрамында легирлеуші элементтердің болуы да ρ және α мәндерін өзгертеді. Жалпы ереже ретінде, металда қатты ерітінді қалыптасуы қарсылықты өсіреді, керісінше қатты ерітінді ыдырауы, гетерогенді жүйе қалыптасуы қарсылықты төмендетеді, дегенмен қарсылық таза металл қарсылығынан жоғарылығын сақтайды. Бекімдеу шамасы елеулі болғанда қарсылық шамасы өседі. Өткізгіштердің өзара түйісу жеріндегі қарсылық (түйісу қарсылығы) металдар қарсылығындай айқын тәуелділікті емес. Металл үстіңгі беті идеалды тегіс емес, микрокедір – бұдырлы. Кедір – бұдырлық дәрежесі металл қасиетіне және өндірудегі өндеу процестеріне

тәуелді. Металл үстіңгі бетінде әртүрлі бөгде ластар (май, т.б.) және тотық (үлдір қабат) болады. Әдетте тотық үлдірдің қалыңдығы металл үстіңгі бетінде бірдей емес, әр учаскелерінде әртүрлі.

Металл шеттерін (үстіңгі беттерін) бір – біріне түйістіргенде беттердің кедір-бұдырлығына орай тікелей түйісу жекеленген нүктелерде орын алады. Тотық үлдірлерінің қалыңдығы бірдей болмағандықтан түйіскен учаскелер электр қарсылығы әрқалай. Сондықтан кернеу келтірілгенде өтетін ток шамасы да бірдей емес. Электрлі түйіспелі пісіруде қыздырумен қатар қысым қолданылады. Сондықтан кедір-бұдырдың қыздырылған нүктелері жаншылып металл тегістеліп, тотықтар тұтастығы бұзылады. Бастапқы салқын металдағы түйіспелі қарсылық шамасына металды өндіруде өңдеу тәсілінің ықпалы зор болып келеді.

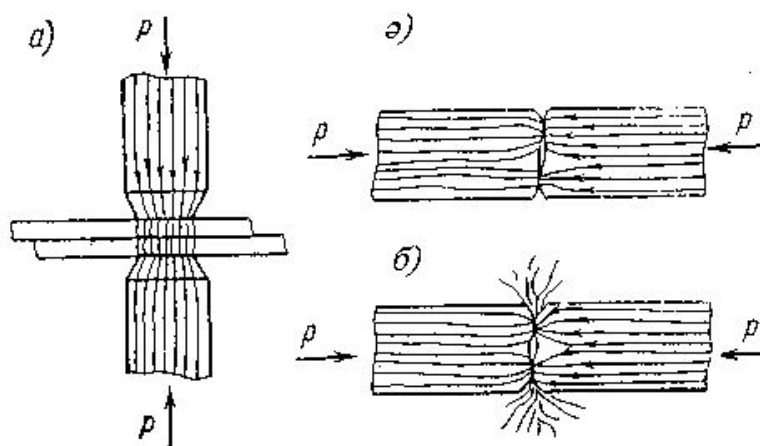
Металды электртогымен түйіспелі қарсылықты тәсілмен қыздырудың негізгі сұлбалары 3.10-суретте келтірілді. Нүктелі пісіруде айқастырылған, қысымдалған екі тілімше металл арқылы ток өткізіледі. Машина электродтары аралығындағы жалпы қарсылық (3.46) формуламен анықталады.

$$R = 2R_{TM} + R_T + 2R_{ye}, \quad (3.46)$$

мұндағы R_{TM} – тілімше металл қарсылығы;

R_T – пісіруге жататын тілімшелердің түйіскен орны қарсылығы;

R_{ye} – электрод шетімен (ұшымен) металл бетінің түйісу орнында өткелдік қарсылық.



3.10-сурет. Электрлі түйіспелі пісіру тәсілінің негізгі сұлбалары:

а – түйістіріп нүктелі пісіру; б – түйістіріп қарсылықты пісіру;

в – түйістіріп балқытын пісіру

Қарсылық R_{TM} формула (3.45) арқылы есептелді, мұнда S – электродының металл мен түйіскен ауданы, $l = \delta$, δ – пісірілетін металл қалыңдығы. Қыздыруда R_{TM} өседі. Электродтар мыстан жасалады. Электродпен металл (болат) түйісу орнындағы қарсылық, тілімше металдар түйісу орнындағы қарсылықтан төмен болады. Сондықтан жалпы қарсылықтың негізгі құрамы пісірілетін металл аралығындағы түйісу қарсылығы болып табылады. Температура көтерілуінің қарқындылығы металдар тілімшесінің түйісу аумағында орын алады. Бұл аумақта металл қысыммен пісіруге жеткілікті температураға дейін қыздырылады немесе балқу температурасына дейін қыздырылады. Нүктелі пісіруде тұрақты сапалылық жергілікті балқытуда қалыптасады. Балқытылған аумақ мөлшері электрод диаметріне тең нүкте аумақ, нүктелі пісіру деп аталуы да осыдан. Бұл пісіруде диаметрі электрод диаметріне сәйкесті балқытылып қатайған құйма ядро қалыптасады. Ядро мөлшері ток өтудегі жылулық бөлінуінің, жылулықтың электрод және пісіру аумағы металына таралу қатынасымен анықталады, бұл қатынас тұрақты емес, айнымалы. Электродтар аса қыздырылмауы және жұмыста төзімділігін ұзақ сақтауын қамтамасыз етуі үшін ағынды сумен салқындатылып тұрады. Сондықтан жылулықтың электродқа таралуы жоғары. Ток шамасы жоғары, сәйкесті түйісу нүктесінде жылулық бөліну қарқынды. Сондықтан ток өту уақыты қысқа, секундтық өлшемде. Токты келтіру және шығару автоматты басқарылып реттеледі. Ток шығарылысымен балқыған металл кристалданып, диаметрі электродтар диаметрінен артықтау пісірілген металл нүктесі қалыптасады.

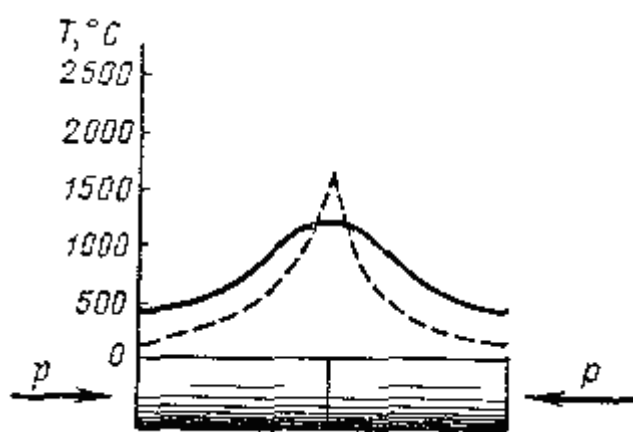
Металл шеттерін (үштерін) түйістіріп пісіруде электротогының өтуінде түйісу аумағының қыздырылу заңдылықтары нүктелі пісіруге сәйкесті, бірақ кейбір ерекшеліктері де бар. Біріншіден мұнда электродтар қарсылығының R_{ye} әсері төмен. Электродтар пісірілетін бұйымдардың түйісу бетінен елеулі қашықтықта болып келеді. Қыспақтау механизмдеріне жылу таралуының рөлі де төмен.

Түйістіріп электрқарсылықты (қысқартылып қарсылықты) пісіруде пісірілетін бұйым шеттері түйістіріліп белгілі шамалы қысым беріледі де, содан соң электртогы өткізіледі. Жылу бөлінуі екі шеттің аумағында жоғары болады, мұндағы қарсылық R_T жоғары болғандықтан. Температура берілген қысым шамасында пісіруге жеткілікті болғанда пісіру аумағында пісіру процесі өтеді.

Түйістіріп балқытып пісіруде бөлшектердің шеттері кернеу берілген жағдайда түйістіріледі, түйістіру беттері арқылы ток өту жағдайында жүргізіледі. Бастапқы түйісу кедір-бұдырлы шеттерінің жеке нүктелерінде орын алады. Түйіскен нүктелер арқылы жоғары тығыздықты ток өтеді, қыздыру өте тез балқу температурасынан жоғары көтеріліп балқыған металл қысыммен атқылап шығып, келесі кедір-бұдыр бет нүктелері түйіседі. Жоғарыда айтылған процесс мұнда да өтеді. Жылулық бөліну процесі жекеленген учаскелерде әрдайым ток тығыздығы жоғары қыздыру шоғырланған жағдайда өтеді. Бірте-бірте кедір-бұдыр жойылып, шеткі беттер ауданы толық түйісіп, балқыған металл қысыммен айдалып шығарып балқыған металл атындағы жоғары температураға қыздырылған, тотықпаған бұйым шеттері түйістіріледі. Осы кезде ток шығарылып пісіру қысымы беріледі де пісіру процесі өтеді.

Түйіспелі түйістіріп пісіруде сырық өзек металда түйісу орнының қарсылығына, қысымға тәуелді жалпы жылу таралу сұлбасы 3.11-суретте келтірілді.

Электртогы өтуімен пісіруде жылулық бөлінуі қарсылық, ток күші және уақытпен анықталады. Қарсылық шамасы шамалы мөлшерлі шекте реттелетін болғандықтан, пісіруде қыздыру ток күшін және уақытты реттеумен анықталады.



3.11-сурет. Электрлі түйістіріп пісіруде жылу таралуының жалпы көрінісі:

— — қарсылықпен пісіру;
---- — түйісу шеттерін балқытып пісіру

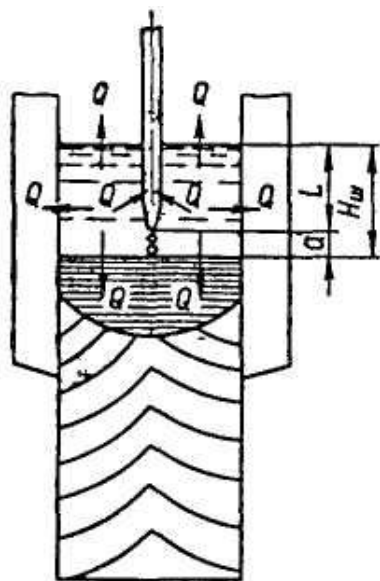
Ток өту уақыты ұзарған сайын жылу ысырапталуы да (жалпы металл көлеміне электродтарға, қоршаған ортаға таралуы) өседі. Сондықтан пісіру процесі неғұрлым тез өтсе, соғұрлым энергетикалық тиімді. Электрлі түйіспелі пісіруде бұйымның мөлшеріне және пісіру тәсіліне орай ток күші 100А-ден ~100000А

аралығында, ал пісіру уақыты (ток өту уақыты) бірнеше секундтан секундтың жүзден немесе мыңнан бөлігіндей уақытта өтеді. Түйіспелі пісіруде айнымалы ток жиі қолданылады, мұнда ток және кернеу мөлшерін кең ауқымды шекте реттеу жеңіл. Айнымалы ток қолдануда пісіру машина жүйесі және пісірілетін металдың индукциялық қарсылығы толық ескеріледі.

3.4. Электрқожды жылу көзі

Балқытылған қождар ток өткізгішті қабілетті болатыны белгілі. Ток өтуден балқыған қожда бөлінетін жылу Ленц-Джоуль заңымен анықталады. Қож температурасы металдың балқу температурасынан жоғары болғанда металл балқуы орын алады, электрқожды пісіру айтылған тәуелдікке негізделген. Электрқожды пісіруде арнайы электрөткізгіштігі әдетті автоматты пісірудегіден жоғары флюстер қолданылады. Пісіру процесі металл жиектері аралығында электрдоғасын жалындатудан басталады. Доға жылулығымен флюс қабаты және электрод материалы балқытылып доға аумағы толық сұйық металл және қожбен толтырылып, ауа ығыстырылып доға сөнеді. Электртогы балқытылған қож және металл арқылы ток өту заңдылықтарына сәйкесті өтеді де ток өтуіне тән жылулық бөлінуде болады. Металл тығыздығы қож тығыздығынан жоғары болғандықтан төменде металл ваннасы, үстіңгі жақта қож ваннасы орналасады. Металл ваннасының үстіңгі бетін металл ваннасының айнасы дейді. Флюстің балқу температурасы металдан төмен болғандықтан қож ваннасы (балқытылған флюс) көлемі артық болады. Электрод (сым немесе тілімше) қож ваннада, оның ұшы металл ваннасы айнасына түйіспейді, балқыған электрод металының тамшылары металл ваннаға ағымдалуда болады. Егер электродты ваннаға келтіру жылдамдығы оның балқу жылдамдығына тең болса, онда электрод ұшымен металл ванна айнасы аралығындағы саңылау тұрақты болып келеді. Қож ваннаның жылулық қорының белгілі үлесті бөлігі металдар жиегін балқытуға қарышталады, ол балқыған электрод материалымен араласып металл ванна қалыптастырады. Қож жылу қорының бөлігі бастапқы флюс мөлшерін балқытуға және пісіру

процесі барысында қосымшаланып келтірілетін флюсті балқытуға кетеді. Электрқожды пісіруде жылу таралуы 3.12-суретте келтірілді.



3.12-сурет. Электрқожды пісіруде жылу таралу сұлбасы:

Q – жылулық ағындары. Қою штрих металл ванна; сирек штрих қож ванна; a – электрод ұшымен металл ванна аралығындағы саңылау;

L – қож ваннаға батырылған электрод ұзындығы; $H_0 = a + L$

Төмен көміртекті болатты тиянақты ережемен пісіруде қож ваннаның орташа температурасы $1750-800^\circ\text{N}$ аралығында болып анықталады. Егер ванна электрлік қуаты өссе қож ванна төменгі деңгейінде (металл ваннаға шектес) температура $2000-2100^\circ\text{C}$ болуы ықтимал.

Қож ваннада электртогы өтуіне қарсылық ванна мөлшері, балқытылатын электрод мөлшері және қождың үлесті электрлік қарсылығымен ρ_θ , бұл қарсылық температураға тәуелді анықталады.

Қож ваннаның жалпы электрлік қарсылығы төменде келтірілген формуламен анықталады:

$$R = \frac{\rho_\theta}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \varepsilon m, \quad (3.47)$$

мұндағы ρ_θ – ванна орташа температурасына сәйкес қождың үлесті қарсылығы, Ом·см; L – электродтың батырылған ұзындығы, см; d – электрод диаметрі, см; ε – коэффициент, а шамасы (электрод ұшымен металл ванна аралығындағы саңылау) өте аз болғанда қарсылықтың елеулі өзгеруін ескереді, $\varepsilon = 1 - e^{-23(H_0 - L)}$; m – түзету коэффициенті, электродтың ваннаға батырылған ұзындығына тәуелді.

Пісіруде бірнеше электрод (n) қолданылса, пісіру ваннасының қарсылығы төмендейді. Электрод аралық қашықтығы L -ден кем емес болған жағдайда электрод саны n болса, қож ваннаның келтірілген қарсылығы

$$R_{e\ddot{e}} \approx R / n, \quad (3.48)$$

мұндағы R – бір электродты ванна қарсылығы (3.47) формула.

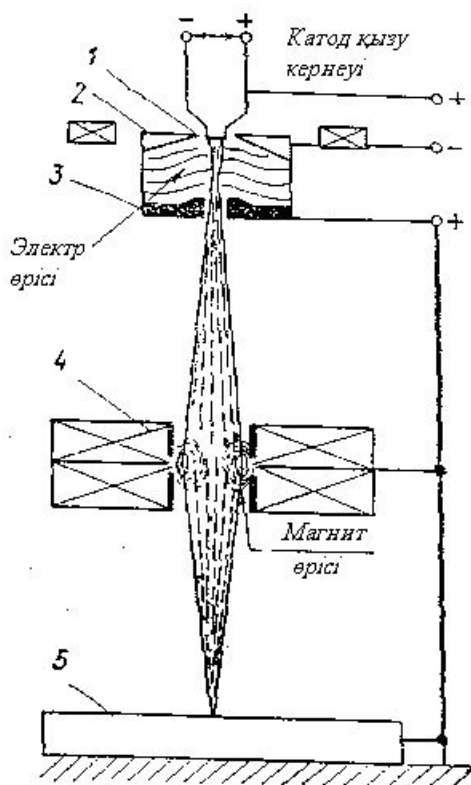
Электрқожды пісіру жоғары қалыңдықты металды пісіруде қолданылады. Пісіру әдетте тік бағытта жүргізіледі. Әдетті пісіру ережесі параметрлері: ток күші $500 \div 1500 A$; кернеу $30 \div 50 V$; пісіру жылдамдығы $0,6 \div 1,5 \text{ м/сағ}$.

3.5. Электронсәулелі жылулық көзі

Электронды сәуле пісіруде жылулық көзі болып табылады. Пісірілетін металл бетін (пісіру орнын) жоғары жылдамдықты электрондар ағынымен атқылағанда металл үстіңгі бетіне соғылып, тежелген электрондардың кинетикалық энергиясы жылулық энергиясына ауысады. Қыздыру қарқыны пісіру процесіне жеткілікті болуы үшін электрондар ағыны қуатты және металл бетіне соқтығу кезінде электрондардың жылдамдығы жоғары болуы шарт. Электрон жылдамдығы жоғары болуы үшін олардың элементар бөлшектерге (атом, молекула) соқтыспай еркін зымырау жолы ұзын болуы керек. Мұндай мүмкіндік терең вакуумда орын алады. Сондықтан электронды сәулемен пісіру арнайы вакуум камерада өткізіледі, мұндағы вакуум шамасы $\sim 10^{-5}$ мм сынап бағанасы немесе $0,0013 H / i^2$.

Шоғырланған электрондар ағыны электронды сәуле болып аталады.

Электронды сәулені пісіруде қолданудың қарапайымдатылған сұлбасы 3.13-суретте келтірілді.



3.13-сурет. Электрон сәулелі пісіру сұлбасы:

- 1 – металкерамикалық эмиттер, катод электродтан электрондар ағынын туындататын; 2 – тоғыстырушы катод электрод; 3 – анод диафрагма; 4 – тоғыстырушы магнитті линза; 5 – пісірілетін бұйым

Катодтан ағындалған электрондар жоғары кернеу әсерімен (10000–100000) В үдетілген қозғалысқа келтіріледі. Электрондар жылдамдығы келтірілген кернеу шамасына және электрондардың еркін зымырау ұзындығын анықтайтын вакуум дәрежесіне тәуелді. Еркін зымырау шегінде электрондардың алатын жылдамдығын төмендегі формуламен анықтауға болады:

$$V = \sqrt{2eU / m} = \sqrt{2 \cdot 1,59 \cdot 10^{-12} / 9,03 \cdot 10^{-28}} = 6 \cdot 10^7 \sqrt{U \hbar / \hbar}, \quad (3.49)$$

Кернеу 10000 В болғанда $V = 6 \cdot 10^9 \hbar / \hbar = 60000 \hat{e} \hbar / \hbar$; 100000 В-та $V \approx 20 \cdot 10^9 \hbar / \hbar = 200000 \hat{e} \hbar / \hbar$.

Тоғыстырушы магнитті линзадан (4) шоғырланып өткен электрондар ағыны пісірілетін бұйым үстіңгі бетіне соқтығады. Электрондар ағыны тоғыстыру нәтижесінде шоғырланып бұйымға берілетін жылулық тығыздығы өсіріледі және бұл үрдіс реттеліп жүргізілу мүмкіндігі бар.

Электрондар ағынын туындататын және электронды сәулені тоғыстыратын құрылғы жинақты түрде электрон зеңбірегі болып аталады.

Электрондар жылдамдығы $100000 \text{ м/с} / \hbar = 10^{10} \text{ м/с} / \hbar$ болса, онда металл үстіңгі бетімен соқтығысуда электрондар кинетикалық энергиясын толық берген жағдайда металға берілетін жылулық.

$$Q = mV^2/2 = 9 \cdot 10^{-28} \cdot 10^{20} / 2 = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \approx 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \approx 4,6 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}.$$

Пісіру шартына жиі сәйкесті жылулық энергиясы $(420 \div 4200 \text{ эВ} / \hbar)$ металл үстіңгі бетін жалпы саны секундта $10^{17} \div 10^{18}$ электрондармен атқылауда орын алады. Металл үстіңгі бетіне соқтығысуда электрон энергиясынан лезде айрылмайды. Электрон металл қалыңдығына белгілі шамада енеді. Электронның металл қалыңдығына ену мөлшері Шекланд теңдеуімен анықталады

$$\delta = 2,1 \cdot 10^{-12} (U^2 / \rho) \hbar, \quad (3.50)$$

мұндағы ρ – металл тығыздығы, г/см^3 .

Мысалы, электронның цирконийға ($\rho = 6,5 \text{ г/см}^3$) бойлауы (енуі) үдетуші кернеу шамасы $U = 50000 \text{ В}$ болғанда

$$\delta = 2,1 \cdot 10^{-12} \frac{25 \cdot 10^8}{6,5} = 0,0081 \hbar = 81 \text{ нм}.$$

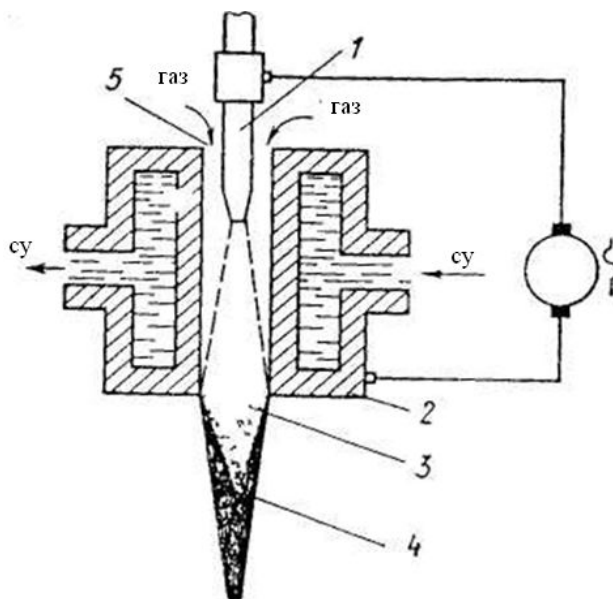
Бұл жағдайда жылулық тек металл үстіңгі бетінде емес, белгілі бір қалыңдығында орын алады. Электрондардың металл қалыңдығына бойлау шамасы электронды сәуле көлденең қимасынан елеулі кем болғандықтан жуықтатылып жылулық үстіңгі бетте бөлінеді деп есептеуге болады.

Электронды сәулемен вакуумда пісіруде жылулық ысырапталу шамасы аз, электр энергиясының жылу энергиясына ауысуының нәтижелі п.э.к. жоғары, $80 \div 98\%$ аралығында болып келеді.

Электронсәулесін тоғыстыру жүйесі металға берілетін жылулық әсерін елеулі шекте реттеуге мүмкіндік береді. Тоғысқан сәуле шағын мөлшерлі қыздыру дағында мол энергияны шоғырландыруға сәйкесті жылулық ағынының жоғары тығыздығын мүмкін етеді, пісірудің басқа тәсілдерімен салыстырғанда.

3.6. Электрлідоғалы плазма

Электрдоғасы арқылы ағындатылған газдар ағыны ионданып, доға аумағынан ионданған газдар ағындалады. Иондану дәрежесі де, температурасы да жоғары ионданған газдар плазма боп аталады. Осындай плазманы техникалық пайдалану сұлбасы 3.14-суретте келтірілді.



3.14-сурет. Электрлі плазма сұлбасы:

1 – вольфрам катод; 2 – сумен салқындатылған мыс анод; 3 – электрдоға бағанасы, балқымайтын вольфрам катод пен мыс анод аралығында жалындылатын; 4 – иондаған газ ағыны плазма; 5 – газ ағыны, доға бағанасында ионданып плазма ағынын қалыптастырады

Электрдоғасы вольфрам электродпен анод аралығында жалындылатылады. Катод пен анод аралығынан газ ағыны жіберіледі – сутек, аргон, ауа т.б.. Газ доға бағанасының жоғары температурасы және жоғары жылдамдықты элементарлық бөлшектермен соқтығысу нәтижесінде ионданады. Жоғары ионданған газ ағыны доға аумағынан ағындалып шығарылады. Плазма температурасы $14000 \div 18000K$ болып келеді және жоғары температураға жергілікті қыздыруда қамтамасыз етеді.

3.7. Үйкеліспен пісіру

Екі дене үстіңгі беттері өзара үйкеліске келтіргенде механикалық энергия жылу энергиясына ауысады. Бөлінген жылу қысым қолданып пісіруге жеткілікті болуы орын алады. Бұл тәсіл іс жүзінде айналмалы денелерді қыздыру және пісіру үшін қолданылады. Егер үйкеліс коэффициентін тұрақты, үйкеліс беттерінің бір-біріне қатынасты айналу жылдамдығына және үлесті қысым шамасына тәуелді емес деп алсақ, онда жылулық ағынының орташа жылдамдығы төменде берілген формуламен анықталады

$$q = k\rho f n R \text{ кал}/(\text{см}\cdot\text{с}) \quad (3.51)$$

мұндағы ρ – үлесті қысым, Н/мм²;

f – үйкеліс коэффициенті;

n – айналу жиілігі, айн/мин;

R – үйкеліс беттерінің бір-біріне қатынасты айналу радиусы;

k – пропорционалдық коэффициенті (жоғарыда келтірілген өлшем бірліктерінде $k \sim 0,067$).

Іс жүзінде үйкеліс беті қыздырылғанда үйкеліс коэффициенті төмендейді. Үйкеліс коэффициентінің айналу жылдамдығына байланысты өзгеруі қанағаттанарлық нәтижеде мынадай формуламен анықталады

$$f = k / (nR)^2 \quad (3.52)$$

Үлесті жылулық қуаты және пісіру температурасына дейін қыздыру уақыты, басқа факторлар тұрақтылығын сақтағанда, айналу жылдамдығына тәуелді.

Ультрадыбысты серпінді тербелістер жылдамдығы да пісіру мақсатында іске асуы мүмкін. Ультрадыбыс тербелістер металға келтірілгенде жанасқан үстіңгі беттерде микрожылжулар орын алып үйкеліс әсерінен жылу бөлінеді. Сонымен қатар, іргелес кристаллиттермен күрделі әсерлесулер нәтижесінде кристаллиттердің қозғалуы (жылжуы), ұсақталуы және микротоктар орын алады. Аталған процестердің жинақты әсері жылулық энергиясын береді және бұл энергия металл жұқа қабатын пісіру температурасына дейін қыздыруға жеткілікті болуы мүмкіндікті.

3.8. Балқытып пісіруде әртүрлі жылулық көздері сипаттамасы

Әртүрлі пісіру жылулық көздері өзіндік ерекшеліктерімен сипатталады және осыған орай олардың пісіру операцияларына технологиялық икемділігі және нәтижелігі анықталады. Пісіру жылу көздерінің жоғары мәнді сипаттамаларына жылу келтірілуінің локализациялық дәрежесі, жылу көзінің максимальды қуаты, қыздыру дағы центріне максимальды нәтижелі жылулық келтірілуі, технологиялық икемділігі, жылу қуатының п.э.к. жатады.

Жылулық келтірілуінің локализациялық дәрежесі жағынан жылулық көздері өзара елеулі алшақты мәнді болады. Жылулық келтірілуінің максимальды локализациясы лазер сәулесімен және электрон сәулесімен қыздыруда орын алады. Балқымалы электродты электрдоғасы да, әсіресе флюс қабатының астында пісіруде жоғары локализацияланған жылулық береді. Жанамалы әсерлі электрдоғасының локализациялануы төмен, төменгі локализациялану газ жалынында және электрқожды қыздыруда орын алады.

Максимальды жылулық қуаты электрқожды (~ 250 кВт) және электрдоғалы (~ 100 кВт) пісіруде болады. Электрон сәулелі жылукөзін де қуаттық ауқымы (1Вт-тан 50 кВт-қа дейін) жақсы. Лазер қондырғыларында максимальды жылулық қуаты (~ 30 кВт). Газ жалынының пісіруде қолданылатын қуаты ~ 10 кВт.

Жылу көзінің энергиясын пайдалы игеру (пісірілетін бұйымға нәтижелі келтірілуі) жағынан максимальды п.э.к. электрон сәулесіне, электрдоғасына, қалыңдығы жоғары металдарды пісіруде электрқожды жылу көзіне келеді. Лазер қуатын, газ жалыны қуатын нәтижелі пайдаланылуы төмен.

Жылу көздерінің технологиялық икемділігі де бірдей емес. Балқымалы электродпен электрдоғалы пісіруде балқыту үнемі орын алады. Мұнда қыздырумен балқыту сабақтасты бірдей өтеді. Балқымайтын электрод қолдануда да балқытпай пісіру қиын десек те балқытпай қыздыруды жүргізуге мүмкіндік бар. Әдетте бұл мақсатта доғаның жылулық қуатын шектеуге, демек қыздыру өнімділігін шектеуге тура келеді.

Газ жалынымен пісіруде металға балқытпай қыздыруды жүргізу жеңіл. Ол үшін жалын тек жалын қуатын реттеу емес, жалынның металл үстіңгі бетінен қашықтығын ұлғайтуда қолданылады.

Электронды сәулемен де металды балқытпай қыздыруға болады, ол үшін электрондар ағынының тоғысуын бұзу, сол арқылы олардың қуатын тоғысқандағыдан мол аумаққа шашырату қолданылады.

Электрқожды пісіруде жылу көзі төмен шамалы жылу қуатын келтіруге жарамайды. Балқытылған қождың электрөткізгіштігі жеткілікті болуы шарт. Балқытылған қождың мол көлемділігін ұстау үшін келтірілген электр қуатты да жоғары болуы шарт. Сондықтан пісірілетін бұйым жұқа болмауы керек.

Айтылғандарға сәйкесті оңтайлы сипаттамалы әртүрлі пісіру құрылымдарды өндіруге ыңғайлы жылу көзі электрдоғасы және одан төмендеу ыңғайлы газжалыны. Басқа жылулық көздерінің технологиялық ыңғайлығы төмен алайда олар арнайы жағдайларда, ерекше құрылымдарды пісіруде мақсатқа толық лайықты болып келеді.

IV. ПІСІРУДЕ МЕТАЛДЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ КӨЗДЕРІМЕН ҚЫЗДЫРЫЛУЫ

4.1. Жалпы түсініктер және пісіру шарттарына сәйкесті жылулық есептеулер

Пісіру процесінің термодинамикалық анықтамасына сәйкесті, мұнда энергия қолданылуы негізгі қажетті шарт болып табылады. Пісірудің басым көпшілікті түрінде жылулық энергиясы қолданылады. Нақтырақ айтқанда химиялық энергияның (газбен пісіруде) және электр энергиясының эквиваленттік жылу қуаты қолданылады. Бұларды жалпыламалы пісіру жылулық көздері деп атайды. Жалғастырылатын бөлшектерді (бұйымды) пісіруде жылулық көзімен жергілікті қыздыру орын алады. Мұнда сәйкесті жылулық процестер өтеді: бұйымды пісіру температурасына дейін белгілі жылдамдықпен қыздыру, бұйым көлемінде температура таралуы, бұйымның салқындау (суу) жылдамдығы. Бұл жылулық процестер жергілікті пісіру орнында басталып металдың көлемінде өрбиді де, металдың пісірудегі температуралық күйі деген ұғыммен сипатталады. Пісірілген жалғастың және жік металының механикалық – беріктігі, созымталдығы, соғуда тұтқырлығы және кейбір жағдайда талап етілетін коррозияға қарсы төзімділігі, ыстыққа төзімділігі т.с.с. қасиеттері пісірудегі металдың температуралық күйіне тәуелді. Пісіруде металдың қыздыру және суыту ережесінің дұрыс, онтайлы болмауы пісірілген жалғас пен жік металында әртүрлі ақаулықтардың – сызаттану, толық балқытылмау, кесіктену, қож араласуы, кеуектенуі, орын алуына ықтималдықты өсіреді. Жылулық процесі, металдың жылулық күйі пісіру өндірісінің өнімділігі және технологиялық тиімділік көрсеткіштеріне де елеулі әсер етеді.

Пісіруде температуралық күй металл көлемінде бірқалыпты болмайды. Жалпы бұйым көлемінің әртүрлі аумақтарында температура мол аумақтықты болып келеді. Бастапқы температурадан, әдетті жағдайда ($10-30^{\circ}\text{C}$ -ден аязда -30° немесе -40°) аса жоғары температураға дейін, металдың балқу, кейде қайнау температурасына (темір үшін $\sim 3000^{\circ}\text{C}$) дейін аралықта болып келеді. Ең жоғары температура қыздыру дағында қалыптасып, металл көлеміне таралады. Қыздыру дағына жуық аумақта температура жоғары болып,

қыздыру дағынан қашықтаған сайын температура төмендейді, жалпы металл көлемінде температуралық күй бірқалыпты болмайды.

Температуралық күйдің бірқалыпты еместігі үнемі өзгермелі және бұл өзгермелік жеткілікті жылдамдықпен өтуде болады. Сондықтан пісіру процесінің кезеңдерінде жылулық процесін және оның пісірілген жалғас сапасына нәтижелі әсерін зерттеуде бірқатар ерекше өзгешіліктер орын алуына байланысты қиындықтар кездеседі. Жоғарыда айтылған температура аралығында металл бастапқы қатты күйден балқытылған (сұйық) күйге, суытылу нәтижесінде кристалдану, яғни қатаю күйіне өтеді. Сонымен қатар балқытылған металдың (пісіру ваннасының) қоршаған ортамен (кож, газдар) физика-химиялық әсерлесуі өтеді. Бұл физика-химиялық әсерлесу нәтижесінде жік металында құрамдық өзгерістер орын алады да, оларды жинақты түсінікпен пісіру ваннасындағы металлургиялық процестер деп атайды. Құрылымдық құбылыстар жік металына іргелес жоғары температураға (балку температурасынан төмен) қыздырылған аумақта да орын алады. Жік металына іргелес құрылымдық өзгерістер орын алған аумақты *термиялық әсер аумағы* деп атайды. Температуралық күйдің пісіру кезеңдеріне тәуелді құбылмалы екенін ескерсек мұндағы металл қасиеттерін тікелей эксперименталды зерттеу күрделі, көп еңбек сіңіруді талап ететіні айқын. Сондықтан металды пісіруде жылулық көзімен қыздыру және металдың суу заңдылықтарын білу және қолдануды негізге алу шарт.

Көптеген жылдар аралығында бірқатар елдерде ғалымдар пісіруде жылулық процесін теориялық және эксперименталды зерттеулер жүргізді. Нәтижесінде пісіру процесіндегі жылулық теориясының есептеу негіздері қалыптасты. Қазір бұл ғылыми түсінік, негіздемелер пісірудің *жылулық негіздемелері* деген жалпы атаумен пісіру процесі теориясының физикалық құрамына кіреді. Қазіргі қолданудағы пісірудің жылулық негіздері және жылулық есептеулер академик Н.Н. Рыкалин және басқа совет ғалымдарының еңбектеріне негізделген.

Жылулық есептеулер, жылу өрісін анықтау, қыздыру жылдамдығын, суыту жылдамдығын есептеу әдістемелері физикада белгілі жылуалмасу процестері мен жылуфизикалық шараларды қолдануға негізделген. Сондықтан жылулық теориясының түсініктері мен мұндағы өлшемдіктерді білу қажеттілік.

Жылу шамасы. Денеде жинақталған жылу шамасы, немесе жылулық көзінен (бөлігінен) келтірілген жылу калория (кал.) немесе джоул (Дж) бірліктерімен өлшенеді. Жылулық көзінен бөлінген жылу q , әдетте секундқа тән жылу бірлігімен кал/с немесе Дж/с шамасымен көрсетіледі.

Денеге келтірілген жылу Q әсерімен дене температурасының өсуі ΔT төменде келтірілген тәуелділікпен анықталады:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (4.1)$$

мұндағы Q – денеге келтірілген жылу, (кал), (Дж); m – дене массасы, г (кг);

c – дененің үлесті жылусыйымдылығы, кал/(г. $^{\circ}\text{C}$) немесе Дж/(кг. $^{\circ}\text{C}$).

Үлесті жылусыйымдылық әртүрлі заттар үшін айрықшылықты, заттардың тегіне орай әртүрлі және температураға тәуелді, яғни $C = f(T)$ және бұл тәуелділік күрделі. Сондықтан техникалық есептеулерде нақтылы температуралар аралығына қатынасты жылусыйымдылығының орташа мәні алынады.

Техникалық есептеулерде көлемдік жылусыйымдылық түсінігі кең қолданылады. Көлемдік өлшем бірлікті (см^3) денені 1°C қыздыруға қажет жылу шамасы, яғни кал/($\text{см}^3^{\circ}\text{C}$), бұл көрсеткіш заттың жылусыйымдылығы мен тығыздығының ($c \cdot \gamma$) көбейтіндісіне тең, мұндағы γ – заттың тығыздығы, г/см ^{3} . Қатты денелерде (металдың қатты күйінде) $c \cdot \gamma$ көбейтіндісінің температураға тәуелділігі $C = f(T)$ сипатты болып келеді.

Әртүрлі фазалық құбылыстарда (металдың қатты күйінде кристалл торының қайта құрылымдалуы, балқу, конденсиялану, кристалдану) денедегі жылу шамасының құбылуында температура өзгеруі орын алмайды. Бұл құбылыстарда жылусыйымдылығы түсінігінің физикалық мәні жоқ. Сондықтан денедегі жалпы жылу қоры (шамасы) көлемдік немесе массалық өлшем бірлігіне тән үлесті энтальпиямен h_m немесе h_v өлшемденеді, сәйкесті кал/г., кал/см ^{3} немесе Дж/кг, кДж/м ^{3} .

Мысалы, техникалық таза темірдің балқу температурасындағы сұйық күйіне тән энтальпиясы h төменде келтірілген есептеумен анықталады.

$$h_{m_{Fe(1535)}} = \int_0^{768} c_1 dT + Q_{768} + \int_{768}^{906} c_2 dT + Q_{906} + \int_{906}^{1401} c_3 dT + Q_{1401} + \int_{1401}^{1535} c_4 dT + Q_{1535}, \quad (4.2)$$

мұндағы c_1, c_2, c_3, c_4 – сәйкесті температуралар аралығында үлесті жылу сыйымдылығының орташа мәні;

Q_{768} – Кюри нүктесінде (768°C) темірдегі құбылыстың жылулық әсері;

$Q_{906} - Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ фазалық құбылыстың жылулық әсері;

$Q_{1401} - Fe_\gamma \rightarrow Fe_\delta$ фазалық құбылыстың жылулық әсері;

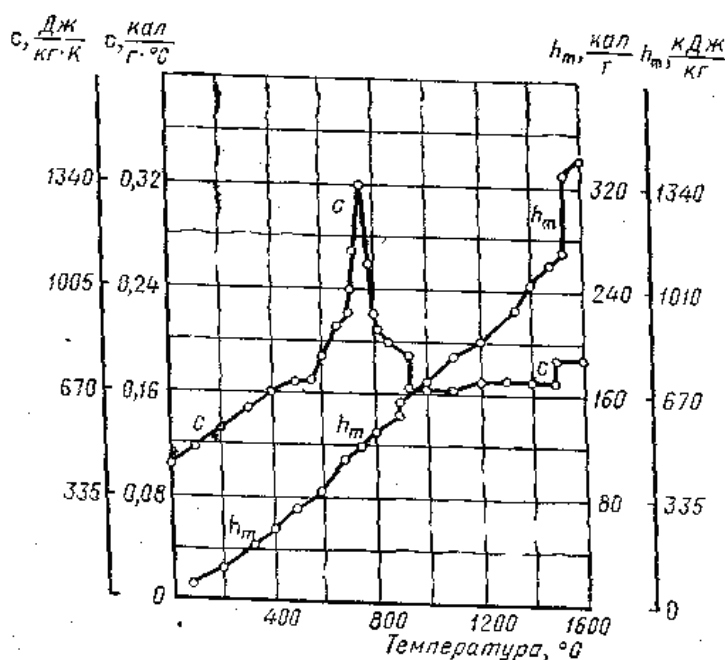
Q_{1535} – темірдің қатты күйден сұйық күйге (балқу) ауысуында жылулық әсер (балқу жылуы).

Қатты темірдің 0°C -ден балқу температурасы 1535°C аралығында үлесті жылу сыйымдылығының орташа мәні төменде келтірілген теңдеумен анықталады

$$C_{0-1535} = h_{m1535} / 1535 - 270 / 1535 \approx 0.18 \text{ кал}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$$

(Қазір аса таза темірдің балқу температурасы 1540°C боп саналады).

4.1-суретте темір жылу сыйымдылығының температураға байланысты өзгеруі және массалық үлесті темір энтальпиясының температураға тәуелді өзгеруі келтірілді.



4.1-сурет. Темір жылу-сыйымдылығы және массалық үлесті энтальпиясының температуралық тәуелділігі

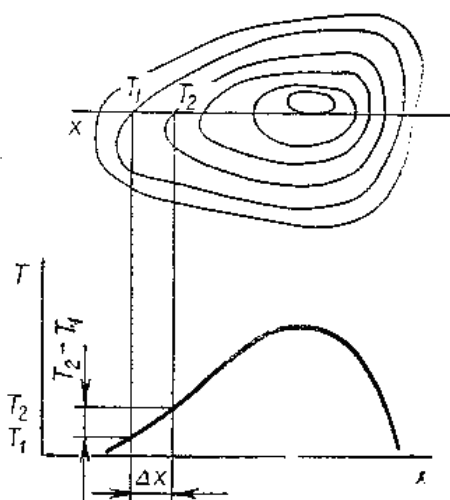
Темірдің балқу жылуы ~ 65 кал/г (0,272 МДж/кг). Бұл балқу температурасындағы (сұйық күйінде) үлесті энтальпияның (~ 325 кал/г немесе $\sim 1,36$ МДж/кг) 20 % жуық шамасын құрайды.

Температура өрісі – дегеніміз кеңістіктегі (денедегі) барлық нүктелерде берілген уақытта орын алған температура шамасының жинағы.

Температура өрісін изотермалармен сипаттау ыңғайлы. Изотермиялық бет – дегеніміз денедегі бірдей температуралы геометриялық нүкте орындары. Изотермиялық беттің қандай да болсын бетпен қиылысуының геометриялық нүкте орындары изотерма болып аталады. Жекеленген жағдай ретінде табақ металды қозғалыссыз шоғырланған пісіру жылу көзімен (электрлідоға, газжалыны, электронсәуле т.с.с.) қыздырғанда үстіңгі бет изотермасы шеңбер болып келеді.

Температура өрісін кеңістіктегі координат жүйесіне келтірілген теңдеумен сипаттауға болады. Мысалы, кеңістікте тікбұрышты координат жүйесінде температура $T = T(x, y, z)$ теңдеумен сипатталады. Уақыт t барысында өзгермелі температура өрісінің тікбұрышты координат жүйесінде теңдеуінің жалпы көрінісі $T = T(x, y, z, t)$ болып келеді. Температура өрісі берілген бағыт xx -та жылжуда болса, үздіксіз өзгерісте болады. Егер (4.2-сурет) екі изотерма температурасы T_1, T_2 , изотермалық аралығын Δx деп белгілесек, онда екі изотерма аралығындағы температура өзгеруінің орташа шамасы $(T_1 - T_2) / \Delta x$ -қа тең болады. Мұндағы Δx екі изотерманың xx бағытындағы арақашықтығы. Δx -ті шексіз кемітумен $\Delta x \rightarrow 0$ шекті мәнді табамыз

$$\lim(T_1 - T_2 / \Delta x)_{\Delta x \rightarrow 0} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.3)$$



4.2-сурет. Изотермалар аралық температура өзгерісі

$\partial T / \partial x$ берілген бағытта температура градиенті болып аталады. Изотермаға жанама сызық бойынша градиент нөлге тең. Градиенттің максимальды мәні изотермаға $\partial T / \partial x$ нормал (перпендикуляр) сызық бойынша келеді.

Берілген нүктеде температура градиенті вектор болады және бұл вектор температураның максимальды өзгеру бағытымен дәлдес изотерма бетіне нормалды болып келеді. Оң таңбасы температура градиенті өсуіне сәйкесті.

Кеңістікте (денеде) температура өрісі бірдей болмаған жағдайда жылудың жоғары қыздырылған аумақтан төмен қыздырылған аумақ бағытында таралуы арқылы температура теңестіріледі.

Жалпы алғанда жылу таралуы жылу өткізгіштік, конвекция, радиация (сәуле энергиясы) арқылы өтеді.

Қатты күйдегі денелерде жылу таралу процесі жылуөткізгіштікпен анықталады. Сұйық және газ тәрізді күйдегі денелерде конвекция және сәуле энергиялы жылу таралудың рөлі басымдылықты. Қатты күйдегі дене бетінен онымен жанасқан газ фазаға жылу таралуы да конвекция және сәуле энергиясымен өтеді.

Жылуөткізгіштік жылулық энергиясының дене элементарлық бөлшектерінің қозғалысы арқылы дененің бір қабатынан, онымен тікелей жанасқан екінші қабатына таралуымен сипатталады. Берілген бағытта температура градиенті неғұрлым үлкен болса, яғни температура алшақтығы айқын болса, соғұрлым осы бағытта жылу таралуы мол болады.

Жылуөткізгіштік арқылы таралатын жылу шамасы мынадай формуламен анықталады:

$$dQ = \lambda \left(-\frac{\partial T}{\partial N} \right) dF \cdot dt, \quad (4.4)$$

мұндағы dQ – жылу; λ – пропорционалдық көбейткіш жылуөткізгіштік коэффициенті боп табылады, λ – әдетте кал/(см.с. $^{\circ}\text{C}$) немесе Вт/(м.К.) бірлігімен өлшенеді $1 \text{ кал}/(\text{см.с.}^{\circ}\text{C}) = 418,7 \text{ Вт}/(\text{м.К.})$; dF – изотермиялық бет элементі; dt – уақыт өлшемі; $\left(-\frac{\partial T}{\partial N} \right)$ изотерма бетіне перпендикуляр (нормал) бағыттағы температура төмендеуі.

Берілген бетте берілген нүкте (x, y, z) арқылы өткен үлесті жылу ағыны $q(x, y, z, t)$, нақтылы уақыт t мерзімінде, шексіз кішірейту жағдайында ΔQ -дің ΔF және Δt -ге қатысының шегімен анықталады:

$$q = \lim_{\substack{\Delta F \rightarrow 0 \\ \Delta t \rightarrow 0}} [\Delta Q / \Delta F \cdot \Delta t] = dQ / (dF \cdot dt) \quad (4.5)$$

(4.4) теңдеудегі dQ мәнін (4.5)-ке қою арқылы төменгі теңдеу шығарылады:

$$q = -\lambda \left(\frac{dT}{dN} \right) \quad (4.6)$$

Бұл тендеу Ф у р ь е ж ы л у ө т к і з г і ш т і к з а ң ы болып аталады. Фурье заңынан көрінетіндей максимальды үлесті жылу ағыны температураның нормалды градиентіне пропорционалды. Коэффициент λ дененің жылуөткізгіштік қабілетін сипаттайды.

Жылуөткізгіштік коэффициенті металдың химиялық құрамына, құрылымына, температураға тәуелді.

Өртүрлі болат маркалары үшін 800°C -қа дейін қыздыруда жылу өткізгіштік коэффициенті елеулі алшақтықты болып келеді. 800°C -тан жоғары температурада бұл алшақтық кемиді де жылуөткізгіштік коэффициенті температураға байланысты шамалы ауытқуда болады, $0,06 \leq \lambda \leq 0,08 \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с}^{\circ}\text{C})$ немесе $25 \leq \lambda \leq 33,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$

Конвективті жылуалмасуда жылу сұйық күйіндегі немесе газ күйіндегі заттың қозғалысты бөлшектерімен таратылады (тасымалданады). Қыздырылған сұйық және газ күйіндегі дененің аумақтарында тығыздық бірдей болмауынан дене бөлшектерінің қозғалысы туындайды.

Егер температурасы T_0 сұйық денеге температурасы жоғары $T_1 > T_0$ қатты күйдегі дене батырылса, онда қыздырылған денемен ұласқан сұйық бөлшектердің температурасы өседі де тығыздығы төмендейді, олар үстіңгі қабатқа көтеріледі. Температурасы төмен сұйық зат бөлшектері төмен қыздырылған денемен ұласады. Осылайша табиғи еркін ағын температураның көлемдік теңелуіне әкеледі. Бұл процесс үдеулі өтуі мүмкін, егер сұйық дене мәжбүрлі қозғалысқа келтірілсе. Пісіру жағдайында пісіру ваннасы металы доға үрлеуімен, газ жалынының механикалық әсерімен, жылу көзінің қозғалысы нәтижесінде ванна аумағында температураның бірқалыпты өзгермеуінен, газ ағындарының ваннаны араластыруы салдарынан балқыған металл мәжбүрлі қозғалысқа келеді.

Қатты, сұйық күйдегі немесе газдан конвективтік жылу таралуының үлесті ағыны Ньютон қағидасы бойынша анықталады:

$$q_k = a_k (T - T_0), \quad (4.7)$$

a_k – конвективтік жылу беру коэффициенті, $\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{\circ}\text{C})$ немесе $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Коэффициент a_k жылу беруші беттің тұлғасы шар, цилиндр, жалпақ тілме мен мөлшеріне және дененің кеңістікте орналасуына (тік, горизонталь, еңкішті); жылу беруші беттің физикалық қасиет-

теріне; қоршаған орта қасиеттеріне (тығыздығы, жылуөткізгішті, тұтқырлығы), өз кезегінде бұл қасиеттер температураға тәуелді; температуралар $(T - T_0)$ айырмашылығына тәуелді. Әдетте a_k шамасы эмпирикалық байланыстылықпен беріледі.

Сәуле энергиясы. Барлық қыздырылған денелер үстіңгі бетінен сәуле таралуы яғни жылулық сәуле ағыны орын алады. Молекулалардың жылулық тербелісті қозғалысы электромагниттік толқындар қоздырады, олар кеңістікке үздіксіз таралуда болады. Мөлдір ортадан бұл сәулелер толық өтеді. Мөлдір емес денеде сәулелердің белгілі бөлігі денеде жұтылады да жылуға ауысады. Стефан – Больцман заңына сәйкесті $T(^{\circ}\text{C})$ температураға қыздырылған дененің үстіңгі бетінен сәуленуден туындаған үлесті жылу ағыны $q_r[\text{кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ немесе $\text{Вт}/\text{м}^2]$ дене үстіңгі бетінің абсолюттік температурасының төртінші дәрежесіне пропорционалды. Стефан-Больцман заңы:

$$q_r = C(T + 273/100)^4, \quad (4.8)$$

мұндағы C – сәуле шашырату коэффициенті, дененің үстіңгі бет күйіне тәуелді. Абсолют қара, яғни сәуле ағынын жұтатын, дене үшін $C_0 = 1,378 \times 10^{-4} \text{ кал}(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K}^4) = 5,76 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$. Сұр денелерде $C = \varepsilon C_0$, мұндағы ε – қаралық коэффициенті. Жылтыратып өңделген металл үстіңгі бетіне $\varepsilon = 0,2 - 0,4$; тотыққан кедір-бұдырлы металдарда 0,6-дан 0,95-ке дейін; балқу температурасындағы сұйық металда 0,9-дан 0,95.

Сәулелік жылулық ағынымен дененің қыздырылу, сууын есептеуде сәулелік жылуалмасу ағынын q_r үстің бетте температура алшақтығымен $T - T_0$ (4.7 формуладағы тәуелдік тәрізді) байланыстылыққа келтіру ыңғайлы. Сонда

$$q_r = a_r (T - T_0), \quad (4.9)$$

мұндағы a_r – сәулелі жылуалмасу коэффициенті, $\text{кал}(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{C})$; $[\text{Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{K})]$. Коэффициент a_r шамасы температураға күшті тәуелділікті. Сұйық зат немесе газбен ұласқан қыздырылған дене үстіңгі бетінен жылу берілуінің толық шамасы конвективтік және сәулелік жылуалмасу процестерінің қабаттасуымен анықталады. Демек үлесті ағын конвективтік және сәулелі үлесті жылуалмасу ағындарының қосындысына тең.

$$q = q_k + q_r = (a_k + a_r) (T - T_0) = a(T - T_0), \quad (4.10)$$

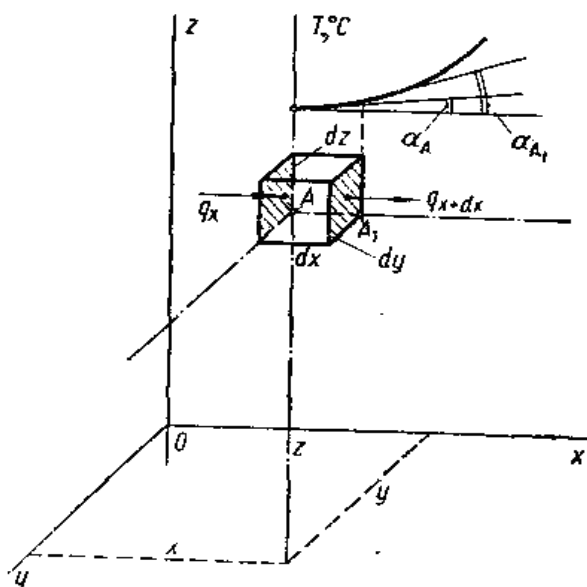
мұндағы a – үстіңгі беттің толық жылу беру коэффициенті, $\text{кал}(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C}) [\text{Вт}(\text{м}^2\text{K})]$.

Салыстырмалы төмен температурада ($200 - 300^\circ\text{C}$) дейін конвексияның рөл жалпы жылу беруде жоғары, ал жоғары температурада негізгі жылу беру сәулелі жылуалмасумен анықталады.

Жалпы жағдайда денедегі өзгермелі температура өрісі $T = T(x, y, z, t)$ тәуелділікпен анықталады. Температура өрісінің сипаттамасына және оның уақытқа қарай өзгеруіне байланысты нақтылы есептеу формулалары әртүрлі болуы мүмкін. Жекеленген шешімдер шығарылатын бастамалық жалпы теңдеу болып жылуөткізгіштіктің дифференциалдық теңдеу алынады және ол үздіксіз жылу таралу жағдайындағы элементарлық көлемде жылу балансын сараптаумен шығарылады.

Кеңістікте нүкте A маңайында орын алған жақтарының ұзындығы d_x, d_y, d_z параллелепипед пішінді элементарлы көлемді алайық (4.3-сурет). Көлем d_x, d_y, d_z -ке дененің жоғары қыздырылған аумақтарынан жылу келеді және төмен қыздырылған аумақтарына жылу беріледі. Егер элементар көлемге келтірілген жылу шамасы одан берілген шамасынан артық болса, онда көлемнің температурасы өседі.

Жалпы алғанда көлемге жылудың келтірілуі, одан берілуі оның кез келген жақтары арқылы xx, yy, zz бағыттарында өтеді.



4.3-сурет. Элементарлық көлемде жылу балансын анықтау сұлбасы

Сондықтан жылу балансын бағалау үшін координаттық үш бағыттағы жылу ағындарын қамтып қарау керек. Егер AA_1 қабырғада температура x -қа тәуелді өзгеруде болса, яғни $T = T(x)$, мұнда $T(x)$ Ox -қа параллель өсте лездегі температура таралуы, сонда нүкте A және A_1 -де температура градиенттері әртүрлі (бірдей емес) шамалы болады. Сондықтан қабырға x -қа келген үлесті жылу ағыны және $x + dx$ -тан шығарылған үлесті жылу ағыны өзгешілікті болып келеді. Сәйкесті жылу ағындары q_x және q_{x+dx} деп алайық және q_{x+dx} тең q_x плюс (немесе минус) жылу ағыны өсіндісі dq_x . Сонда $q_{x+dx} = q_x + dq_x$ немесе

$$q_{x+dx} - q_x = dq_x = (\partial q_x / \partial x) dx \quad (4.11)$$

Элементарлық көлем $dxdydz$ -те dt уақытта өзгерген жылу шамасы dQ_x тең

$$dQ_x = q_x dydzdt - q_{x+dx} dydzdt - dq_x dydzdt = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dxdydzdt$$

Аналогиялы қарау арқылы жылу ағынын және элементар көлем $dxdydz$ та жалпы жылу жинақталу шамасын есептеу формулалары шығарылады.

$$\begin{aligned} dQ_x &= -\frac{\partial q_x}{\partial x} dxdydzdt, \\ dQ_y &= -\frac{\partial q_y}{\partial y} dxdydzdt, \\ dQ_z &= -\frac{\partial q_z}{\partial z} dxdydzdt \end{aligned}$$

$$dQ = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dxdydzdt \quad (4.12)$$

Фурье заңына сәйкесті жылу ағыны мәнін жылуөткізгіштік коэффициенті мен температура градиенті арқылы беруге болады, яғни

$$dQ = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz dt \quad (4.13)$$

Егер дене изотропты деп есептеп жылуөткізгіштік коэффициенті барлық бағытта бірдей, яғни $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ десек және λ таңбасын дифференциал таңбасының сыртына шығарсақ, сонда теңдеу (4.13) былайша жазылады,

$$dQ = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dx dy dz dt \quad (4.14)$$

Бұл жылу шамасы қарастырылған көлем $dx dy dz$ температурасын $dT = \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dt$ шамасына көтереді. Сондықтан dQ мәнін көлем, көлемдік жылу сыйымдылығы және температура өсуімен көрсетуге болады.

$$dQ = dx dy dz c \gamma \left(\partial T / \partial t \right) dt \quad (4.15)$$

(4.14) және (4.15) теңдеулердің оң жағын өзара теңдеу және $dx dy dz dt$ -ға қысқарту нәтижесінде төменде келтірілген теңдеу шығарылады:

$$\lambda = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = c \gamma \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.16)$$

Функция $T = (x, y, z, t)$ -нің x, y, z өстері бойынша алынған жекеленген екінші туындыларының қосындысы Лаплас операторы болып аталады. Тікбұрышты координаттар жүйесінде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T, \text{ осыдан теңдеу шығарылады}$$

$$\left(\partial T / \partial t \right) = (\lambda / c \gamma) \nabla^2 T = a \nabla^2 T \quad (4.17)$$

Лаплас операторының оң таңбалылығы қарастырылған нүктеде денеге жылу келтірілгенін, теріс таңбалығы – денеден жылу берілгендігін көрсетеді.

Күрделі параметр $a = \lambda / c\gamma$ температура өткізгіштік-коэфффициенті деп аталады ($\text{см}^2/\text{с}$ немесе $\text{м}^2/\text{с}$). λ және c мәндері және біршама дәрежеде γ мәні де температураға тәуелді болғандықтан a мәнінде температураға тәуелді елеулі өзгерісті болып келеді.

Жекеленген жағдайларда қатынасты температура өткізгіштік теңдеуін қарапайымдатылған түрге келтіруге болады. Қалыңдығы шектеулі металл тілмесінде металл қалыңдығын бойлай температура өрісі бірдей болуы орын алады және z координатына тәуелді емес. Бұл жағдайда жылу жазық бетте таралады деп қарауға болады, теңдеу.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\left(\partial^2 T / \partial x^2 \right) + \left(\partial^2 T / \partial y^2 \right) \right] \quad (4.18)$$

Бұл жағдай жұқа табақ металды түйістіріп, бір қабат жікпен (электрдоғалы және газбен пісіруде) қалың табақ металды бір рет жікпен (электрқожды пісіру) пісірудегі жағдайға жеткілікті дәрежеде жақын.

Диаметрі ұзындығынан көп кем сырықша металдың көлденең қимасында температура таралуы бірдей болуы орын алуы мүмкін. Бұл жағдайда температура таралуы y және z координаттарына тәуелсіз, яғни $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ және $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$. Сонда жылу таралу теңдеуі

$$\partial T / \partial t = a \left(\partial^2 T / \partial x^2 \right) \quad (4.19)$$

Бұл жағдай түйістіріп, түйіспелі пісіруде және бір үшін де электрдоғасы жалынданған электрод өзегінің қыздырылуында орын алады деп қарастыруға болады.

Тұрақталған (стационар) процесте дене элементтеріне қандай шамада жылу келсе, сондай шамада жылу шығады, температура тұрақтығын сақтайды, демек, $T = \text{const}$ және $\partial T / \partial t = 0$. Осындай тұрақты процесс үшін жылуөткізгіштік дифференциалды теңдеуі – Лаплас операторының нөлге теңдігімен анықталады ($\nabla^2 T = 0$). Сонда жылу таралу теңдеуі жазықтықта тұрақты (стационар) процесс үшін $\left(\partial^2 T / \partial x^2 \right) + \left(\partial^2 T / \partial y^2 \right) = 0$, сызықты жағдайда $\partial^2 T / \partial x^2 = 0$.

Жылу таралу процесі әр уақыт лезінде дененің кез келген нүктесінде жылуөткізгіштік дифференциалды тендеуімен анықталатын болғанмен, әртүрлі жағдайларда жылу таралуын есептеу үшін белгілі болуы қажетті шарттар бар, бұларды – ш е к т і ш а р т т а р дейді. Шекті шарттар: денеде бастапқы жылу таралуы және дененің шекаралық жылуалмасу шарттары.

Бастапқы жылу таралуы процестің уақыт есептеудің басталуы боп алынған $t=0$ кезеңінде дененің көлемін толық қамтып беріледі.

$$T(x, y, z, t) = T_0(x, y, z) \quad (4.20)$$

Жылу таралу процесінің келесі кезеңін қарау бастапқы күйден басталады.

Ш е к т і ш а р т т а р – дененің қоршаған ортамен жылулық әсерлесуін көрсетеді. Дене көлемін толық қамтып, жылуөткізгіштік тендеуіндегі тәуелділікке сәйкесті жылу таралуында дене шексіз жылу өндіруші боп сипатталады. Нақтылы жағдайда ондай денелер орын алмаса да, бірқатар жылулық есептеулерді жүргізуде қолайлы болатындықтан шексіз дене түсінігі қолданылады, мұнда ешқандай үстіңгі беттік шекара жылуағынына бұрмалану бермейді деп есептеледі. Шексіз денелер: шексіз дене (үш бағытты өлшем бойынша); шексіз жалпақ тілме; шексіз сырықша. Шекті дене үстіңгі бетінде орын алатын немесе берілген шарттар дененің шексіз кеңістігінен бөлініп алынған жылу таралу процесі жылуөткізгіштікпен анықталатын аумағы сипатты. Шекті шарттар – әртүрлі сипаттамалы болады. Бұлардың пісіру процесіне қатынасты маңыздылары: бірінші, екінші, үшінші текті шекті шарттар.

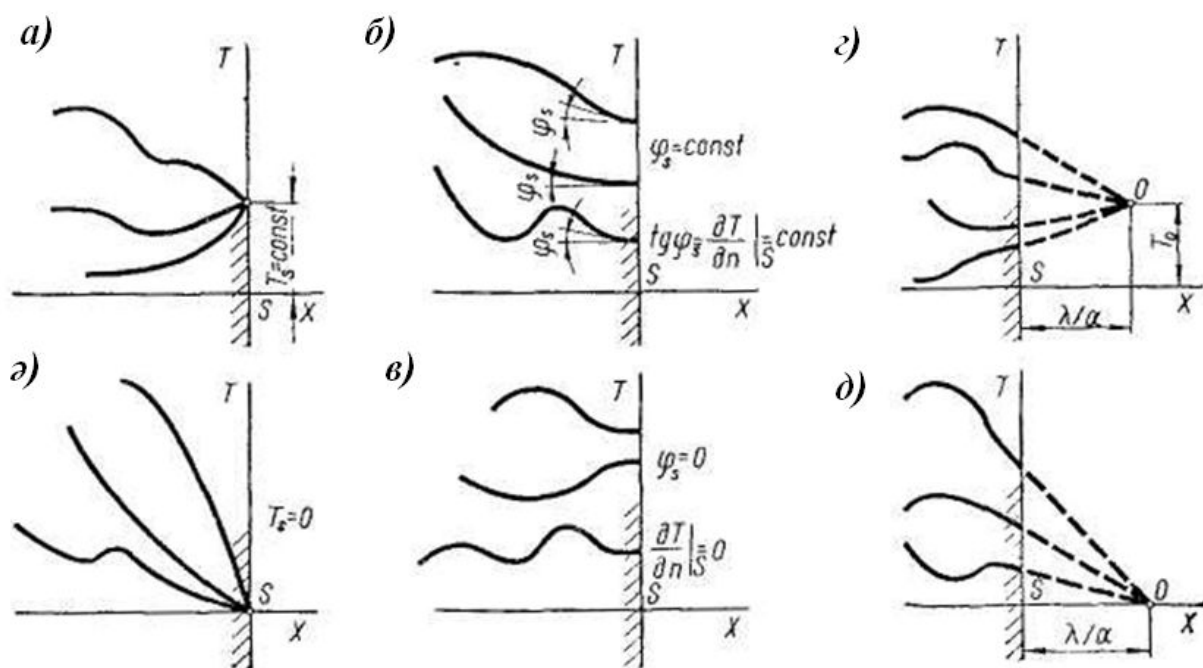
1-тексті шарт: жылуөткізгішті дененің үстіңгі бет температурасы үстіңгі бет координаттарына және уақытқа тәуелді беріледі $T_s = T_s(x, y, z, t)$. Бұл шарт талабы бойынша денеде жылу таралуы қандай болса да, шекаралық нүктелерде температура берілген шамада болуы керек.

Изотермиялық шекаралық шарт 1-тексті шарттың жекеленген жағдайы. Мұнда $T_s = const$ болып алынған. Мысалы, дене үстіңгі бетін белгілі температуралы сұйық заттың ағынмен ұласып өтуінде шекаралық нүктеде температура тұрақты деп алуға болады

(4.4 а-сурет). Есептеуге ыңғайлы болуы үшін үстіңгі бастамалық бет температурасын $T_s = 0$ деп алуға болады.

2-текті шарт: дене үстіңгі беті арқылы үлесті жылу ағынының таралуы үстіңгі бет координаттары және уақытқа тәуелді беріледі $q_s = q_s(x, y, z, t)$. Бұл жағдайда шекарада температура қисық сызығы әртүрлі шамалы болуы мүмкін, бірақ жеке жағдайда берілген градиент тұрақты $tg\varphi_s = \frac{\partial T}{\partial n}|_s = const$ (4.4 б-сурет).

Адиабатиялық шекара 2-текті шарттағы жеке жағдай. Бұл жағдайда шекарадан өтетін жылу ағыны нөлге тең, $q_s = 0$ (4.4 в – сурет). Егер дененің қоршаған ортамен жылуалмасуы төмен, дененің ішкі жылу ағындарымен салыстырғанда елеусіздей кем болса, онда іс жүзінде шекараны адиабатикалық деп есептеуге болады.



4.4-сурет. Дененің қоршаған ортамен жылулық әсерлеу сұлбасы

3-текті шарт: шекаралық жылуалмасуы берілген температура-лы орта болған жағдаймен беріледі. Ньютон ережесі бойынша жылу берудің үлесті ағыны $q_s = \alpha(T - T_0)$. Бет шекаралыға ағындалып келген үлесті жылу ағыны, $q_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_s$. Қарапайымдатылған 3-текті

шарт $\alpha(T_s - T_0) - \lambda \frac{\partial T}{\partial N}|_s$ орын алған жағдайда тән. Бұл шарт 4.4 в – суретте келтірілген сұлбамен сипатталады.

Жеке жағдайда, қоршаған орта температурасы ($T_o = const$) тұрақты болғанда, есептеулерде $T_o = 0$ деп алу ыңғайлы. Сонда $\alpha T_s = -\lambda \frac{\partial T}{\partial N}|_s$ болады (4.4 з- сурет).

Изотермиялық шарт жылуалмасудың $\alpha / \lambda \rightarrow \infty$ сәйкесті шекті жағдайы. Жылу беру коэффициентінің шамасы соншама үлкен, ал жылуөткізгіштік коэффициент соншама аз болғандықтан үстіңгі бет температурасы қоршаған орта тұрақты температурасына тең деп айтарлықтай жуық.

Адиабатиялық шарт басқаша шекті $\alpha / \lambda \rightarrow 0$ болғандағы жағдайда сәйкесті, мұнда шекарадан келген жылуағыны шамасы нөлге жуықтаған. Қысқа уақыт мерзімінде тынық ауамен ұласқан металл бұйымның үстіңгі бетін адиабатиялық деп қабылдауға болады.

Жылуөткізгіштік есептерін шығару әдістемелері а н а л и т и к а л ы қ және с а н д ы қ болып бөлінеді. Аналитикалық әдістемелер арасында жиі қолданатындары: Фурье әдістемесі, операторлық әдістеме және жылу көздері әдістемесі. Пісіру процесіне қатынасты ең қолайлысы жылу көздері әдістемесі.

Аналитикалық әдістемелер тек сызықты шекті шарт, сызықты дифференциалдық теңдеумен сипатталатын процестер шешімін береді. Осыған байланысты жылуфизикалық қасиеттер көрсеткіштерінің температураға тәуелділігін ескеру мүмкін болмайды. Сондықтан пісіру процесіне қатынасты жылулық есептеулерде жылуөткізгіштік коэффициенті λ , көлемдік жылусыйымдылық $c \cdot \gamma$, жылу беру коэффициенті α температураға тәуелсіз тұрақты шамалар боп алынады. Сондай-ақ фазалық құбылыстар жылуы да ескерілмейді. Жылуфизикалық шамалар λ , $c \cdot \gamma$, α мәні болып қарастырылатын температура аралығына орташа мәндері алынады, нәтижесінде есептелген температура өрісі нақты табиғи температура өрісінен бұрмаланған болып келеді. Басым көпшілік жағдайда есептеуге орын алған ауытқулар қолдануға мүмкінділік шегінен шықпайды. Жылулық есептеулердің барлық процесі жылулық ережесінің оңтайлы бағытын анықтауға бағдарлық зор.

Өртүрлі металл және қорытпаларды пісіруде пайдаланатын жылуфизикалық шамалар 4.1-кестеде келтірілді.

4.1-кесте

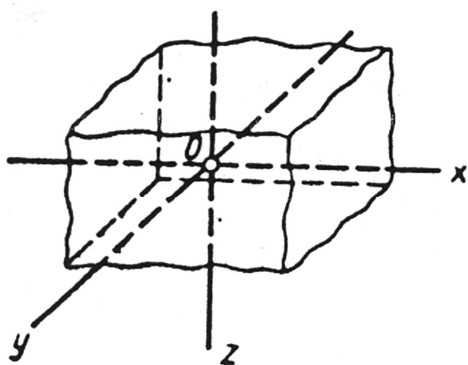
Пісіруде жүргізілетін жылулық есептеулерде қолданылатын
жылуфизикалық шамалар мәні

Металл, қорытпалар	Жылуөткізгіштік коэффициенті λ		Көлемдік жылу- сыйымдылық $c\gamma$		Температура- өткізгіштік коэффициенті a	
	$\frac{\epsilon \ddot{a} \ddot{e}}{(\tilde{m} \cdot \tilde{n}^0 \tilde{N})}$	Вт/м.К.	$\frac{\epsilon \ddot{a} \ddot{e}}{(\tilde{m}^3 \cdot \tilde{n}^0 \tilde{N})}$	$\frac{\dot{I} \ddot{A} \ddot{e}}{(\dot{i}^3 \cdot \hat{E}.)}$	$\frac{\tilde{m}^2}{\tilde{n}}$	$\frac{\dot{i}^2}{\tilde{n}}$
Төменкөміртекті және төменлегирлен- ген болат	0,09-0,1	37,6- 41,7	1,15-1,25	4,81- 5,23	0,075- 0,09	$(7,5-9) \cdot 10^{-6}$
Таттанбайтын хромникельді аустенитті болат	0,06-0,08	25,0- 33,3	1,13-1,15	4,73- 4,81	0,053- 0,07	$(5,3-7) \cdot 10^{-6}$
Мыс	0,83-0,9	368- 376	0,92-0,95	3,86- 3,89	0,95- 0,96	$(9,5-9,6) \cdot 10^{-5}$
Жез	0,28	117	0,83	3,47	0,34	$3,4 \cdot 10^{-5}$
Алюминий	0,65	272	0,65	2,52	1,0	$1 \cdot 10^{-4}$
Техникалық титан	0,03-0,04	12,5- 16,7	0,68	2,84	0,045- 0,06	$(4,5-6) \cdot 10^{-6}$

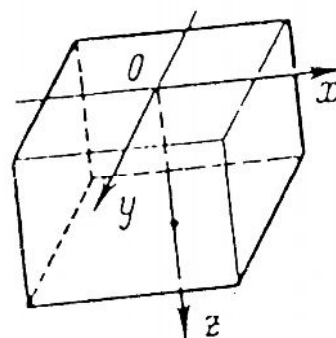
4.2. Жылу көздерімен металды қыздыруды есептеудегі сұлбалар

Пісіру жағдайында жылу таралу процесі аса күрделі. Солай болса да нақтылы есептерді (мәселелерді) идеал теориялық сұлбаларға келтіру арқылы, бірқатар жағдайларда шешудің қарапайымдатылған әдістемелерін қолдануға қол жеткізілген. Дене де жылу таралу сипаты оның тұлғасы мен мөлшеріне күшті тәуелділікті. Пісірудегі есептеулер үшін қыздырылатын дененің сұлбалары қабылданған, олар төменде келтірілді.

1. Шексіз дене – дененің xx , yy , zz өстері бойындағы созылуы соншама, оның шекаралықтары денедегі жылу өрісі сипаттамасына әсер етпейді (4.5 – сурет). Бұл түсінік тек алдын ала тұжырымдамалау үшін қолданылады.



4.5-сурет. Шексіз дене сұлбасы

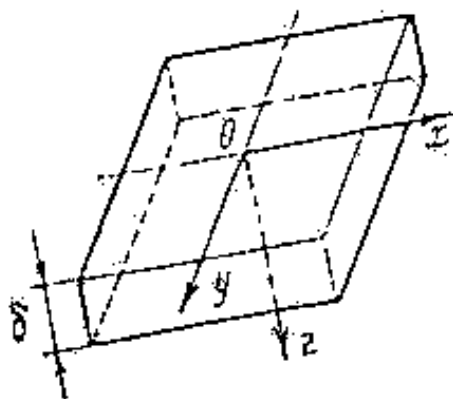


4.6-сурет. Жартылай шексіз дене сұлбасы

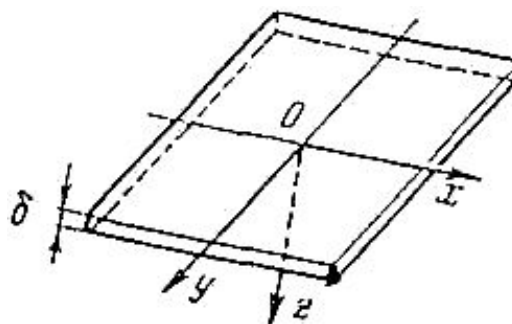
2. Жартылай шектелген дене – дененің тек бір ғана шекаралық $z=0$ беті бар және осы бет арқылы жылу көзі әсер етеді (4.6-сурет). Мұндай дене жылу кеңістікті. Пісіруде бұл сұлба ірі мөлшерлі бұйымның үстіңгі бетіне балқытып білікше қаптастыруға сәйкесті.

3. Жалпақ тілім – параллель жазықтармен $z = 0$ және $z = \delta$ шектелген дене (4.7-сурет). Бұл сұлбаға қалыңдығы орташа ұзындығы мен ені мол табақ металды жатқызуға болады. Мұндай денеде жылу ағынының таралуы кеңістікті, бірақ шекаралық беттер болғандықтан бұрмаланған.

4. Жалпақ жұқа тілімше – қалыңдығы шамалы тілім. Оның қалыңдығы δ шамалығы соншама, температурасы қалыңдығы бойынша бірқалыпты болып теңелген (4.8-сурет). Мұнда жылулық ағыны жазықтықтық. Бұл сұлба металды қалыңдығын бойлай толық балқытып пісіруде және оттекті ажыратылып кесуде пайдаланады.

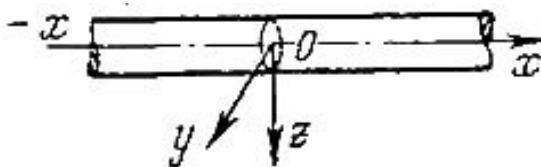


4.7-сурет.
Жалпақ тілім сұлбасы



4.8-сурет.
Тілімше сұлбасы

5. Сырықша – түзу сызықты өсті ұзындығы мол жеткілікті дене (4.9-сурет), шеткі беттері жылу таралуына әсер етпейді. Жылу ағыны сызықты болып келеді.



4.9-сурет. Сырықша дене сұлбасы

Жылу көзінің түріне, дененің қыздырылу сұлбасына сәйкесті денеден жылу өрісінің және температураның таралуын есептеу ережелері мен формулалары бар. Пісіру процесінде жылу көзінің түріне, металдың жылу-физикалық қасиетіне байланысты, пісіру ережесі параметрлерін т.б. факторларды ескеріп металдың максимальды температурасын, балқыған металл мөлшерін, қыздыру және суыту жылдамдығын есептеулер жүргізіледі.

Металды балқытып (кейде балқытпай) қыздырумен пісіру жалпыламалы қамтылуында термиялық пісіру болып аталады. Мұнда қолданылатын энергия – электр және химиялық энергиялардың жылуға ауысуы (жылулық қуаты).

Газ жалынымен пісіру процесінде химиялық энергияның жылу энергиясына ауысуы қолданылады. Химиялық энергияның жылулыққа пәрменді ауысуы қарқынды өтетін экзотермиялық реакцияларда – жану реакцияларында орын алады. Жергілікті қыздыру мақсатында да, техникалық қолайлығында да газ күйіндегі жанар араластардың оттеkte жану реакциясы өте тиімді. Пісіру техникасында оксидты қосындылар беретін жану реакциясы, кейде бастапқы өнімдер ыдырауының ішкі энергиясы пайдаланылады.

Пісіру жағдайында химиялық реакциядан алынатын жылу энергиясы қыздырылатын денеден тыс аумақта бөлінеді. Сондықтан тыс аумақтан қыздырылатын материалға жылу тарату қосымша процесс ретінде өтеді.

Балқытып пісіруде газ жалынның жылу энергиясы толық пайдаланбайды. Жалынның пайдалы әсер коэффициенті η пайдалы іске асырылған $Q_{\text{пай}}$ жылудың жалынның жалпы шығарған жылу қуатына $Q_{\text{жал}}$ қатынасына тең, яғни

$$\eta = \frac{Q_{\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}}{Q_{\alpha\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}} \quad (4.21)$$

Жалын жылуының ысырапталуы, термиялық пайдалы әсер коэффициенті $\eta_{\dot{o}}$ арқылы анықталады. Металдың минимальды пісіру температурасына дейін (балқытып пісіруде $Q_{бал}$), қыздыруға пайдаланылған жылуды Q_M деп алайық. Бұл пайдалы қолданылған жылу. Газ жалынның қарышталған жылу энергиясын Q_{Γ} деп белгілейік. Сонда т.п.э. коэффициенті

$$\eta_{\dot{\alpha}} = \frac{Q_M}{Q_{\dot{\alpha}}}.$$

Денені белгілі бір температураға дейін қыздыруға қажетті жылу мөлшері дененің массасына m , жылусыйымдылығына және қыздырылу температурасына пропорционалды екені белгілі, демек $Q = mcT$. Металға қатынасты мөлшерлерді m индексмен, газ жалынына қатынастыларды Γ индексмен белгілеп төмендегі формуланы аламыз

$$\eta_{\dot{\alpha}} = \frac{m_i c_i \dot{O}_i}{m_{\dot{\alpha}} c_{\dot{\alpha}} \dot{O}_{\dot{\alpha}}}. \quad (4.22)$$

Жылу тек жоғары қыздырылған денеден төмен қыздырылған денеге өтетін болғандықтан жалын жылулығы металды T_m температураға дейін қыздыруға толық пайдалынбайды, жылудың бір бөлігі Q_0 кеңістікке таралған газдармен кетеді.

Металл бетінен кететін газдардың температурасын T_0 -ге тең деп $T_0 = T_m$ алсақ, онда т.п.э. коэффициенті тең болады:

$$\eta_{\dot{o}} = \frac{Q_i}{Q_{\dot{\alpha}}} = \frac{Q_{\dot{\alpha}} - Q_i}{Q_{\dot{\alpha}}} = \frac{\dot{o}_{\dot{\alpha}} \tilde{n}_{\dot{\alpha}} \dot{O}_{\dot{\alpha}} - \dot{o}_i \tilde{n}_i \dot{O}_i}{\dot{o}_{\dot{\alpha}} \tilde{n}_{\dot{\alpha}} \dot{O}_{\dot{\alpha}}} = 1 - \frac{\dot{O}_i}{\dot{O}_{\dot{\alpha}}} \quad (4.23)$$

(4.23) формуладан көрінетіндей, газ жалыны температурасының пайдалануы соғұрлым толық болады, неғұрлым металдың қыздырылу температурасы төмен болса және газ жалынының температурасы неғұрлым жоғары болса. Техникалық жанар газдар арасында жалын температурасы ең жоғары газ ацетилен. Сондықтан газбен пісіруде ацетилен қолданғанда $\eta_{\dot{o}}$, т.п.э. салыстырмалы жоғары.

Газбен пісіруде температуралық көрсеткішпен қатар жылулық қасиетінің мәні зор. Жалынның пісіру бағытында қозғалуына сәйкес жоғары температуралы газ ағымы салқын металл үстіңгі бетімен тікелей жанасады, нәтижесінде жылулық әр уақыт бірлігінде жалыннан тартылып тұрады. Сондықтан негізгі және қосымша металды балқытуға, пісіру ваннасын қалыптастыруға кететін жылулық, мұны нәтижелілікті жылулық Q_H дейді, жалынның толық жылу қуатынан Q_T төмен болады. Осыған орай пісіруде жалын қуатының пайдалы әсерлік коэффициенті түсінігі қолданылады.

$$\eta_{i.ж.} = \frac{Q_i}{Q_T},$$

мұндағы $\eta_{n.э.}$ – жылу қуатының п.э.к.;

Q_H – нәтижелілікті жылулық $\frac{Q_H}{Q_T}, \left(\frac{Q_H}{Q_T} \right)$;

Q_T – жалынның толық жылулық қуаты, жанар газдың жылуөнімділік қабілеттілігінің төменгі мәні, $\frac{Q_T}{V_a}, \frac{Q_T}{V_a}$.

Ацетилен үшін $Q_T = 53 \frac{Q_T}{V_a} = 12600 \frac{Q_T}{V_a}$

Ацетилен үшін $\eta_{i.ж.} = \frac{Q_i}{14,7 V_a}$, мұндағы V_a – ацетиленнің сағаттық қарышталуы, $dm^3 / сағ$.

Газ қарышталуы өскенде жалынның нәтижелілікті қуаты өседі, газдың қарышталуы да өседі, бірақ газ қарышталуының өсуі жалын қуатының өсімділігінен басымдылықты болады. Сондықтан жалын қуатының п.э.к. $\eta_{n.э.}$ жалын қуаты өскен сайын төмендейді. Жалынның нәтижелілікті қуатына ең жоғары әсер ететін фактор жанаргаз қарышталуы.

Сонымен қатар, пісіру ереже параметрлері де белгілі шамада әсер етеді: жалынның металл бетіне еңкіштелуі, жалынның қозғалу жылдамдығы, газдың ағындалу жылдамдығы, коэффициент β мәні.

Газжалынының жылу қуатының шоғырлануы төмен, электрдоғасымен салыстырғанда. Металдың қыздырылуы жатық, температура градиенті электрдоғасымен салыстырғанда аз, жылу қуатының металды балқытуға келетін үлесті шамасы аз.

Металды балқытудың толық коэффициенті төменгі формуламен анықталады

$$\eta_{\text{о.а.}} = \frac{\nu \cdot F_{\text{æ}} \cdot \gamma \cdot I_{\text{аё}}}{14,7 V_{\text{а}}}$$

мұндағы ν – шілтер қозғалысының орташа жылдамдығы, м/сағ;

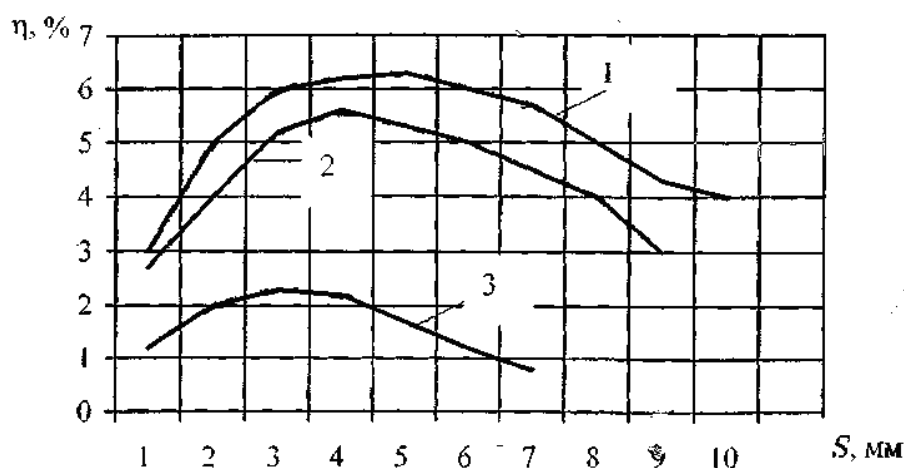
γ – металл тығыздығы, кг/м³;

$H_{\text{бол}}$ – балқу температурасындағы балқытылған металдағы (жылу қоры) жылу мөлшері, Дж/кг (болат үшін 1,34 МДж/кг);

$F_{\text{жс}}$ – жік металының көлденең қимасының ауданы, м²;

$V_{\text{а}}$ – ацетилен қарышталуы, дм³/сағ.

Газбен пісіруде толық п.э.к.-тің әртүрлі газдар пайдалануда болаттың қалыңдығына орай өзгеруі төменгі суретте келтірілді.



4.10-сурет. Әртүрлі қалыңдықты болаттарды газжалынымен қолдан пісіруде толық п.э.к. өзгеруі:

1 – ацетилен-оттек жалыны; 2 – пропан-бутан жалыны ($\beta=3=3,5$);

3 – сульфид-оттек жалыны

Суреттен көрінетіндей жалпы газбен пісіруде – толық п.э.к.-ті төмен. Мол жылу қуаты әртүрлі ысыраптарға жатады. Мысалы, қалыңдығы 3 мм болатты ацетилен-оттек жалынымен пісіруде балқытылған металл аумағындағы металды қыздыруға жылу қуатының 45%-ға жуығы қарышталады. Металл қалыңдығы өскен сайын және металдың, жылу өткізгіштігі артқан сайын балқу аумағынан тыс металды қыздыруға қарышталатын жылу қуатының үлесті шамасы аса түседі.

Балқытып пісіруде жылу көзі электрдоғасы немесе газ жалыны болуы жиі орын алады. Мұнда доға немесе жалын пісірілетін металл

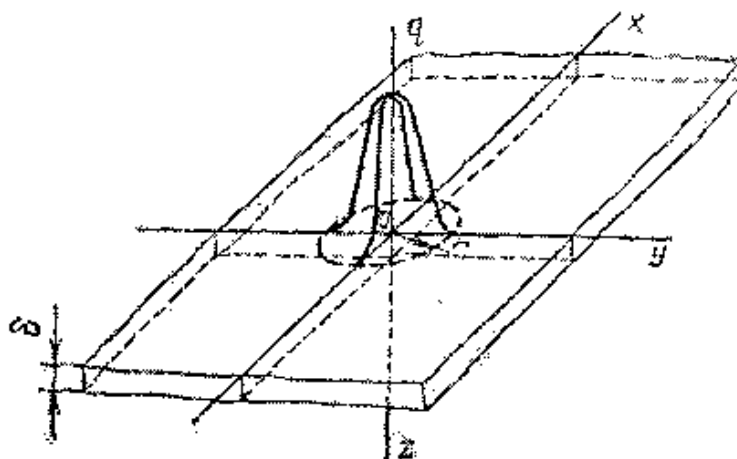
бетімен белгілі бір мөлшерлі ауданда түйіседі, яғни денеге жылу металл бетінің шағын ауданында келтіріледі, бұл шағын ауданды қыздыру дағы деп атайды. Қыздыру дағының мөлшері электрдоғасында газ жалынынан елеулі кем, яғни электрдоғасында жылу шоғырлануы газ жалынындағыдан жоғары. Қыздыру дағының ауданында жылу келтіру қарқындығы біркалыпты емес. Жылу ағынының ең жоғары тығыздығы қыздыру дағының орталық нүктесіне келеді де оның шетіне қарай жылу ағынының тығыздығы төмендейді. Н.Н. Рыкалин көрсеткендей жылу көзі өсі металл бетіне перпендикуляр болып бағытталғанда жылу ағынының қыздыру дағы орталығынан шетіне қарай бағытта қарқындылығының өзгеруін, жеткілікті дәрежелі дәлдікпен математикалық нормалды таралу заңымен сипаттауға болады. Айтылған заңдылыққа сәйкесті дақ орталығы мен орталықтан r қашықтықтағы шеңбер нүктесінде жылу ағынының таралуы төменгі формуламен есептеледі:

$$q_r = q_{\max} e^{-kr} \quad (4.23 \text{ а})$$

мұндағы $q_{\max}$ – қыздырудағы орталығындағы жылу ағынының тығыздығы кал/(см²·с); q_r – орталықтан r қашықтықтағы жылу ағынының тығыздығы; k – жылу келтірудің шоғырлану коэффициенті, жылу көзінің мөлшері және жылу бөлінуінің таралуына тәуелді.

Формула (4.23)-ге сәйкесті қалыңдығы δ жұқа тілменің, оның қалыңдығы δ шамасы соншама аз тілме қалыңдығын бойлай жылулық ағыны лезде тарайды, жылу ағынының таралу сұлбасы 4.11-суретте келтірілді.

Формула (4.23 а)-дан белгілі болуындай орталық O -дан z қашықтықтағы нүктеде жылулық шамасы жылу келтірудің шоғырлану коэффициенті k мәніне тәуелді. 4.2, 4.3-кестелерде салыстыру мақсатында электрдоғасы жылу ағынының және ацетилен-оттек жалынының жылу таралу сипаттамалары келтірілді.



4.11-сурет. Шоғырланған жылу көзімен тілмені қыздыруда жылу ағыны сұлбасы:

δ – тілме қалыңдығы; o – жылу ағыны орталығы;
 q – максималды жылу ағыны; r – шеңберлі жылу дағының радиусы
 (жылу ағынының бағыты тілме бетіне перпендикуляр).

4.2-кесте

Электрдоғасы жылу ағынының сипаттамасы

Доға сипаттамасы	Максимальды үлесті жылу ағыны кал/(см ² ·с)	Шоғырлану коэффициенті k , $\frac{1}{\text{мм}^2}$ формула (4.23)
Балқымайтын көмір электрод доғасы	1000-2000	1-1,5
Аргон ортасында балқымайтын (вольфрам) электрод доғасы	500-600	6-14,0
Балқымалы (темір) электрод доғасы	1000-2000	1-1,5
Балқымалы (темір) электродты флюс кабаты астындағы доға	6000	6-10,0

4.3-кесте

Ацетилен-оттек жалынының жылу таралу сипаттамасы

Шілтер үштігі нөмірі	Ацетилен қарышталуы V_a , дм ³ /сағ.	Қыздыру дағы орталығында жылу ағынының максимальды тығыздығы, $q_{\max}$, кал/(см ² ·с)	Шоғырлану коэффициенті k , 1/см ²
1	150	47	0,39
2	250	67	0,35

4.3-кестенің жалғасы

Шілтер үштігі нөмірі	Ацетилен қарышталуы V_a , дм ³ /сағ.	Қыздыру дағы орталығында жылу ағынының максимальды тығыздығы, $q_{\max}$, кал/(см ² ·с)	Шоғырлану коэффициенті k , 1/см ²
3	400	72	0,31
4	600	82	0,28
5	1000	93	0,23
6	1700	111	0,20
7	2600	121	0,17

Басымды көпшілікті жағдайда пісіру операциясы пісірілетін бұйымды жергілікті (нақтылы шектеулі аумақта) қыздырылуымен жүргізіледі. Қыздыру температурасы пісірілетін материалдар қасиеттері және пісіру түрімен анықталады. Балқытып пісірудің барлық түрлерінде пісірілетін бұйым пісіру аумағында металдың балқу температурасынан $T_{\text{бл}}$ жоғары температураға қыздырылуы шарт, яғни металл температурасы $T_m > T_{\text{бл}}$ болуы шарт. Қысыммен пісіру түрлерінде – пісіру процесінің температурасы пісіру орнында пластикалық деформация мүмкіндігі және жеткілікті шамада диффузия жылдамдығы болуы талап етіледі. Қысыммен пісіруде $T_{\text{бл}} > T_m > T_l$ мұндағы T_l – нақтылы жағдайда қойылған талаптарды қанағаттандыратын пісірілген жалғас қалыптасуша кепілдікті минимальды температура.

Пісіру жұмысында жылулық энергиясын неғұрлым жоғары тиімді пайдалану үшін жылулық пісіру аумағына максимальды шоғырландырылып келтірілуі қажет. Пісірілетін металл жиектерін минимальды қажетті көлемде пісіру температурасына дейін қысқа мерзімде қыздыруды іске асыру қажет.

Пісіру процесінде әртүрлі энергияның жылулық энергиясына ауысуы пайдалынады. Бұлардың арасында қазіргі уақытта жиі қолданылудағылары химиялық энергияның жылулық энергиясына, электрлік және механикалық энергиялардың жылулық энергиясына ауысуы, сондай-ақ аталған энергиялардың құрамасы.

Пісіруде іс жүзінде орын алатын жылу көздері түрліше болып келеді. Олар төменде келтірілгендей жүйеленеді:

а) таралу нышанына орай шоғырланған (нүктелі, сызықтық, жазықтық, көлемдік) және таралымды (жылудың денеге белгілі заңдылықпен келтірілуі);

ә) әсер ету уақытына сәйкес: лезде және үздіксіз әрекеті;

б) уақыт мерзімінде қарастырылушы нүктеге қатынасты орналасуы бойынша: қозғалыссыз, қозғалысты (жылжымалы), жедел қозғалысты.

Нүктелі жылулық көзі – көлемі шексіз аз шекті мәні нүкте болып көрсетілетін жылулық көзі.

Сызықтың жылу көзі – жылулығы түзу сызық бойымен бірқалыпты таралған жылу көзі.

Жазықтық жылу көзі – әлдебір жазықтықта бірқалыпты таралған, мысалы түйістіріп түйіспелі пісіруде өзара түйістірілген пісіру беттері.

Көлемдік жылу көзі – әлдебір көлемде бірқалыпты жылулық тарататын жылу көзі, мысалы, электрдоғалы пісіруде электрод өзегінде.

Лезде әрекетті жылу көзі – әсер ету уақыты нөлге талаптанған жылу көзі (бастамалық сұлба ретінде ғана қарастырылады).

Үздіксіз әрекетті жылу көзі – жылулық қуаты тұрақты, үздіксіз немесе жеткілікті ұзақ мерзімді әсер ететін жылу көзі.

Қозғалыссыз жылу көзі – тұрақты қуатты дене көлемінде де, дене бетінде де жылжымайтын жылу көзі. Балқытып пісірудің негізгі тәсілдерінде бұл сұлбаның қосалқы ғана мәні бар.

Жылжымалы жылу көзі – тұрақты қуатты, дене көлемінде немесе дене бетінде түзу сызықты тұрақты жылдамдықпен қозғалысты жылу көзі.

Жедел қозғалысты жылу көзі – қозғалысты, қозғалыс жылдамдығына орай жылу көзінің алдында жылу таралуын елемеуге болатын жылу көзі. Бұл сұлба шынайы жағдайдан көп алыс, бірақ кейбір процестерді қарапайым формуламен есептеуге мүмкіндік береді.

Пісіруде жылу көзімен металдың қыздырылуы белгілі бір сұлба негізінде жүргізіледі. Пісіру кезінде бұйымда жылу таралуы өте күрделі процесс. Сондықтан есептеп анықтау үшін қарапайымдатылған әдістемелер, шынайы нақты есепті идеалды теориялық сұлбаларға келтіру қолданылады. Денеде жылу таралуы – дене тұлғасы мен мөлшеріне тығыз байланысты.

Дене сұлбасын және жылу көзін дұрыс анықтау есептеуді нақтылы орын алған жағдайда неғұрлым дәлдікті жақындатуға мүмкіндік береді. Өртүрлі есептеу жағдайларында ұсынылатын есептеу сұлбалары 4.4-кестеде келтірілді. Пісірудегі жылулық есептеулерде орын алатын жылу процестеріне қатынасты есептеу формулалары шығарылған. Бұл формулаларды шығару жолдары мен қолдану шектері [1] жұмыста жеткілікті дәрежелі берілген. Біз мұнда жылу көздері ерекшеліктеріне сәйкесті өртүрлі денелерді қыздыру процесінде жылулық есептеулер формулаларының пісіру процесінің физикалық негіздемелік мәніне ғана тоқтаймыз. Алдымен лездік әрекетті жылу көзінен жылу таралуын қарайық.

Шексіз денедегі нүкте 0 -ға қысқа уақытты аралықта нүктелі жылу көзімен жылу Q (кал немесе Дж) келтірілген болсын. Егер дене шекарасы (олар шексіз созылған) жылу ағынын бұрмаламайды және дененің бастапқы температурасы T_0 дене көлемінде тұрақты және нөлге тең деп алсақ, сонда жылуөткізгіштік теңдеуі төмендегідей өрнектеледі:

$$T_{(R,t)} = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-R^2/4at}, \quad (4.24)$$

мұндағы $T_{(R,t)}$ – 0 нүктесінен R см қашықтықтағы нүктедегі жылулық (0 нүктесіне) келтірілген соң t_c уақыт өткендегі температура. $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, ол x , y , z – координат өстері бойынша 0 нүктесінен қарастырылушы нүктеге дейінгі қашықтық, см (0 нүктесі координат нүктелерінің басталуы);

c – дененің үлесті жылусыйымдылығы, кал/(г. $^{\circ}\text{C}$);

γ – дене тығыздығы, г./см ^{3} ;

a – температура өткізгіштік коэффициенті, см ^{2} /с;

e – натурал логарифм негізі.

R және t ұлғайған сайын дене нүктесінде температура төмендейді.

Дене изотермалары орталығы 0 нүктесінде дұрыс шардың беті сипатты болып келеді.

Егер денені жартылай шексіз деп алсақ 0 нүктесі ($z = 0$) орналасқан бетте және бұл беттен қоршаған ортаға жылу берілмейді деп алсақ, онда барлық жылу 0 нүктеден барлық бағытта таралады, бірақ жоғарыда қарастырылған шексіз дененің жартысы сипаттас

болады. Осындай жартылай шексіз дененің әр нүктесі жылуды шексіз денедегіден екі есе артық алады. Сонда есептеу формуласы.

$$T_{(R,t)} = \frac{2Q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \cdot e^{-R^2/4at} \quad (4.25)$$

Түзу сызықты жылу көзінде қалыңдығы δ см тілмеге лезде келтірілген жылу Q , қабылданған шекті шарттарға сәйкес $z = 0$ және $z = \delta$ жылулық өткізбейді, жылуөткізгіштік дифференциалды теңдеуінің шешуі төмендегі өрнекті болады.

$$T_{r,t} = \frac{Q/\delta}{c\gamma 4\pi at} \cdot e^{-r^2/4at}, \quad (4.26)$$

мұндағы r – қарастырылушы нүктенің жылу көзінен қашықтығы, см; қарастырылушы жағдайда жылу ағыны жазықтықты, z -ке тәуелді емес, сондықтан $r = \sqrt{x^2 + y^2}$. Бұл жағдайда изотермалар цилиндр пішінді, цилиндр өсі тілме бетіне перпендикуляр, 0 нүктесі арқылы өтеді.

Егер шексіз ұзындықты сырықшаға оның ауданы F көлденең қимасы арқылы жазықтықты жылу көзімен лезде жылу Q келтірілсе, онда сырықша үстіңгі бетінен қоршаған ортаға жылу берілмеген жағдайда, жылу xx өсі бағытында таралады. Сонда теңдеу өрнектелуі

$$T_{(x,t)} = \frac{Q}{c\gamma F \sqrt{4\pi at}} \cdot e^{-x^2/4at}, \quad (4.27)$$

мұндағы x – қарастырылушы қима координаты, жылу келтірілген қимадан бастап алынған қашықтықта.

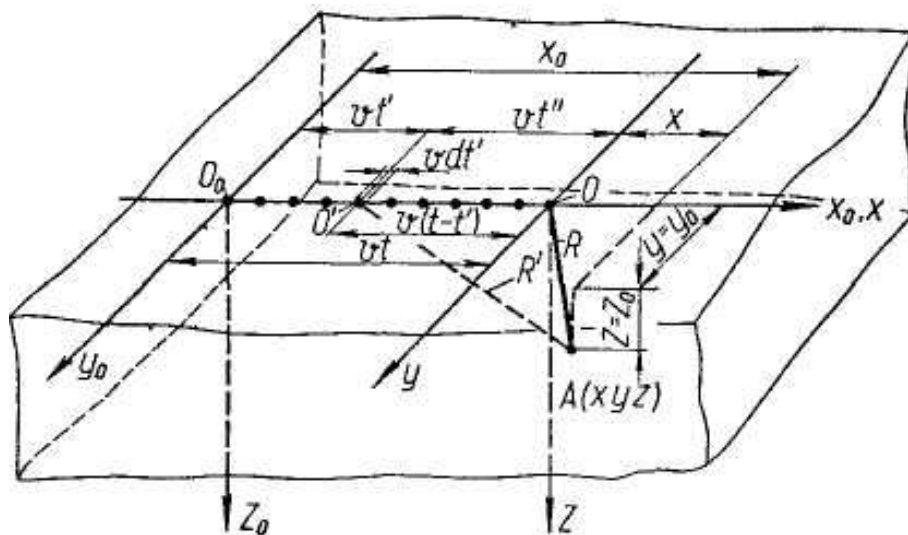
Бұл жағдайда изотермалар жылу келтірілген жазықтыққа параллель жазықтық болып келеді.

Жоғарыда қолданылған жорамалдарға сәйкесті жылу көзінің әсер еткен нүктесінде, (яғни сәйкесті $R = 0$; $r = 0$; $x = 0$) $t \rightarrow 0$ жағдайында температура шексіз өрлеу бағытында өседі.

Металды пісіруде лезде әсер ететін жылу көзі сипаттылықты емес, пісіруде қолданылатын жылу көздері арасында басымды сипаттылықты үздіксіз әрекетті, жылжымалы, жылулық қуаты тұрақты жылу көзі. Бұл жағдайда жылу таралу процесі теңдеуін табу

үшін қабаттасу принципін қолданады. Аталған принцип бойынша денедегі кез келген нүктеде температура, дене көлемінде кездейсоқ орналасқан, дербес лездік әсерлі жылу көздерінен жылу таралуы қосындысының нәтижесі болып қаралады. Бұл негіздеуге сәйкесті үздік әрекетті жылу көзінің әсерін шексіз аз (кішкентай) элементтерге бөліп, олардың жылуөткізгіштік денеге жекеленген элементарлық әсерін талдап қарайды. Жылжымалы жылу көзі жағдайында кез келген дене элементарлық көлемінің жылулық күшін анықтау үшін әр лездік жылу көзімен қарастырылушы көлем (нүкте) арақашықтығының өзгеруін есепке алу қажетті.

Жартылай шексіз дененің үстіңгі бетімен түзу сызықты қозғалысты, тұрақты жылдамдықпен v , жылу қуаты тұрақты q нүктелі жылу көзі қозғалыста деп алайық. Жылжымайтын (денемен байланысты) координат жүйесіндегі O_o нүкте жылу көзінің уақыт $t = 0$ -де бастапқы орны және осы нүктеден жылу көзі әрекеті басталады. $O_o x_o$ өсі мен жылу көзінің қозғалыс бағыты сәйкесті. $O_o y_o$ дененің шекті жазықтығына келеді. $O_o z_o$ өсі дене қалыңдығын бойлай бағытталған болсын.



4.12-сурет. Тұрақты қуатты, тұрақты жылдамдықты қозғалысты жылу көзінде жартылай шексіз денеде жылу таралу сұлбасы

O нүктесі арқылы басқа координаттар жүйесін салуға болады, ол O_x, O_y, O_z бағытында денемен байланысты емес және жылукөзімен

бірге жылжуда болады. O_x өсі $O_o x_o$ өсімен дәлдес, үйлесілу. O_y және O_z өстері сәйкесті $O_o y_o$ және $O_o z_o$ өстеріне сәйкесті.

Денеді қозғалыссыз координаттарда x_o, y_o, z_o координаттары, жылжымалы координаттарда x, y, z координаты нүкте A -ны бөліп қарап, онда жылжымалы жылу көзінің O_o нүктеден O нүктеге дейін жылжығандағы жиынтықты әсерімен температура өзгеруін көрейік.

Жылу көзінің қыздыруы басталған соң t' уақыт кезеңінде жылу көзі нүкте O' болды деп алайық. O' нүктедегі жылу көзі шексіз аз уақыт dt' аралығында $dQ = q \cdot dt'$ жылуын береді. Бұл жылу – жылу көзінің O нүктесінде жету уақыты аралығында $t-t'$, A нүктеде температура өзгеруін туындатады, бұл температура өзгерісін $dT(t')$ деп белгілейік. $O_o O$ аралығында барлық лездік жылу көздері әсерінің қосындысы нүкте A -да температура өзгеруінің мәнін береді:

$$T_{(t)} = \int_0^t dT(t') \quad (4.28)$$

OA арақашықтығы A нүктесінің қозғалыссыз координаттар жүйесі бойынша радиус-вектор квадратына тең. $R'^2 = (OA)^2 = (x - vt')^2 + y_o^2 + z_o^2$. Жылу көзінің әсер ету уақыт ұзақтығы $t - t'$. Бұл шамаларды теңдеу (4.25)-ке қою арқылы төменде келтірілген теңдеу шығады.

$$T_{(Rt)} = \frac{2qdt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x_o - vt')^2 + y_o^2 + z_o^2}{4a(t-t')} \right].$$

Доғаның әсер ету уақыты 0 -ден t аралығында лездік жылу көздері әсерінен барлық элементарлы температура өсуінің қосындысы

$$T_{x_o, y_o, z_o, t} = \int_0^t \frac{2qdt'}{c\gamma [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp \left[-\frac{(x_o - vt')^2 + y_o^2 + z_o^2}{4a(t-t')} \right].$$

Бұл үздіксіз әсерлі, тұрақты жылдамдықпен v қозғалысты нүктелі жылу көзінен, жартылай шексіз денеді жылу таралу теңдеуі. Теңдеу қозғалыссыз координаттар жүйесіне қатынасты. Теңдеу шешуі жеңілденеді, егер жылу көзімен байланысты қозғалысты

координаттарға хуз қатынасты алса. Олай болғанда координаттар байланыстығы сәйкесті былайша беріледі: $x = x_o - vt$; $y = y_o$; $z = z_o$.

Уақыт өзгерістілігі шамасы $t'' = t - t'$ енгізу және интеграл астындағы функцияны түрлендіру арқылы, қозғалысты координаттар жүйесіне келтірілген жылжымалы жылу көзінен температура таралу теңдеуін шығарамыз:

$$T_{x,y,z,t} = \frac{2q}{c \cdot \gamma (4\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{3/2}} \exp\left(-\frac{v^2 t''}{4a} - \frac{R^2}{4at''}\right), \quad (4.29)$$

мұндағы $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ – температура өрісіндегі нүкте A -да кеңістіктегі радиус-вектор квадраты.

Жоғарыда (4.29) келтірілгендей типті интегралдар оған кірген параметрлердің барлық мәнінде шешіле берілмейді.

Теңдеулер (4.26) және (4.27) аналогиялы қолдану арқылы үзіліссіз әрекетті тұрақты жылдамдықты қозғалысты жылу көзінен температура таралу теңдеуі шығарылады. Мұнда сызықты және жазықтықты жылу көзінен, сәйкесті тілме және сырықшада үстіңгі беттен жылу берілуі ескеріледі. Бұл пісірудегі орын алатын нақты жағдайда жуықтатылу.

Тілмеде сызықты жылу көзі үшін.

$$T_{x,y,t} = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''} \exp\left[-\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t'' - \frac{r^2}{4at''}\right], \quad (4.30)$$

мұндағы $r^2 = x^2 + y^2$.

Сырықшада жазықты жылу көзінде

$$T_{x,t} = \frac{q}{c\gamma F (4\pi a)^{1/2}} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_0^t \frac{dt''}{t''^{1/2}} \exp\left[-\left(\frac{v^2}{4a} + b\right)t'' - \frac{x^2}{4at''}\right] \quad (4.31)$$

(4.29) ÷ (4.31) теңдеулер пісіру жағдайында орын алатын бір қатар жылулық мәселелерінің шешімін береді.

Пісіруде жылу таралу процесін есептеу сұлбасы

Жылу көзі сипаттамасы	Процесс	Бұйым тұлғасы	Есептеу сұлбасының сипаттамасы	Процестің есептелу кезеңі
1	2	3	4	5
Ұзақ уақыт әсерлі; жылу көзі іс жүзінде түзу сызықты және бір қалыпты қозғалысты.	1. Доғалы пісірумен үстіңгі бетке білікше балқытып қаптастыру.	Ірі көлемді массалы дене.	Жартылай шексіз дене үстіңгі бетінде нүктелі жылжымалы жылу көзі.	Қыздыру және суыту.
		Қалың табақ металл.	Жоғарыдағыдай жалпақ бетте.	- // -
	2. Түйістірілген жікті бір қабат жік салып, доғалы пісіру.	Жұқа табақ металл.	Сызықты жылжымалы жылу көзі, жалпақ тілме жылу берушілікте.	-// -
	3. Түйістірілген жікті электр-қожды пісіру.	Қалың табақ металл.	Сызықты жылжымалы жылу көзі мен тілме жылу берушіліксіз (аса қалың) немесе жылу берушілікті (орташа қалыңдықты).	- // -
	4. Түйістірілген жікті газбен пісіру. Бір қабат жікпен	Жұқа табақ металл.	Таралымды (жалған сызықты) жылжымалы жылу көзі жылубергішті тілме металл пісіруде.	Суыту
Қысқа мерзімді әсерлі; жылу көзі іс жүзінде қозғалыссыз	5. Үстіңгі бетте шағын мөлшерлі ақаулықтарды пісірінділеу	Ірі көлемді массалы дене.	Жартылай шексіз дене үстіңгі бетінде нүктелі лездік жылу көзі.	- // -
		Қалың табақ металл.	Жоғарыда келтірілгендей беттегі қабат.	- // -

4.4-кестенің жалғасы

1	2	3	4	5
	6. Түйістірілетін металл жиектеріне іліністіру, жік салу.	Жұқа табак металл. Көлденең қима ауданы шағын (аз) сырықша металл.	Сызықты лездік жылу көзі, жылу бергішті тілме металл. Жазықты лездік жылу көзі, сырықша жылу бергішті денеде.	- // - - // -

4.3. Мол массалы денені нүктелі жылу көзімен пісіруде термиялық есептеулер

Шоғырланған жылу көзімен қыздыруда (мысалы электрдоғасы, электрон сәулесі т.с.с.) бастапқы кезде жоғары температураға қыздырылған аумақ мөлшері кішкене (өте шағын) болады. Уақыт өту барысында бұл аумақ мөлшері өседі. Бұл заңдылық оңай бақыланады. Жылу көзінің әрекеті (әсері) тоқтатылған соң (мысалы, доға сөндірілді) металдың салқындауы қарқынды өтеді, себебі жылу келтірілуі жоқ, ал алдыңғы келтірілген жылу денеге таратылуда болады. Айтылғандарға сәйкесті қыздыруды үш сатыға бөліп қарайды:

1) жылуға қанығу, мұнда жылу көзімен қыздырылған аумақ мөлшері ұлғаяуда болады;

2) шекті немесе тұрақталған күй - температура өрісі бірқалыптығын сақтап жылу көзімен қоса жылжуда болады (квазитұрақты температура өрісі);

3) температураның теңелуі (бірқалыптыққа келуі) – жылу көзінің әрекеті тоқталғаннан соңғы күй.

Жеткілікті ұзындықты жіктерді пісіруде орын алады деп есептеуге болатын шекті немесе тұрақталған күйді қарайық. Жоғарыда айтылғандай, пісіруде металдың қыздырылуын бірқатар жағдайларда жартылай шексіз денеге жылу көзінің әсері сұлба да қарауға болады. Бұл жағдайда қыздырудың шекті күйін жылжымалы координаттар жүйесінде теңдеу (4.29) да $t \rightarrow \infty$ деп алып шығарамыз. Теңдеудегі интеграл 0-ден ∞ шегінде алынады. Сонда денедегі кез

келген нүктеде, кез келген уақыт кезеңінде шекті күйде температура анықталады.

$$T_{(R,x)} = \frac{q}{4\pi\lambda R} e^{-(v/2a)(x+R)} \quad (4.32)$$

Жеке жағдайда $v = 0$ деп алсақ, онда мол массалы денені қозғалыссыз, қуаты тұрақты, үздіксіз әсерлі жылу көзімен қыздыруда процестің шекті күй төмендегі формуламен беріледі:

$$T_{(R)} = q / (2\pi\lambda R) \quad (4.33)$$

Жылу қуаты q берілген жылу көзімен (пісіруде бұл әсерлі пайдалынған жылу қуаты q_n) нақтылы металды (λ), қыздыруда температура тек R -ға тәуелді. Тәуелділік $T = \int (R)$ әдеттегі гипербола болып келеді. Жылу қуаты q берілген жағдайда, берілген қашықтық R -де температура жылу өткізгіштік коэффициентіне кері пропорционал.

Жылу көзі XX өсі бойымен жылжығанда жылу көзінің соңындағы дене нүктесінде (x мәні теріс таңбалы) температура жылу көзінің жылдамдығына тәуелді емес және қозғалыссыз жылу кезінде шекті күй температурасына тәуелді. Себебі $R = -x$, ал $T_{(R)} = \frac{q}{2\pi\lambda R}$. Оң таңбалы өсі бөлігінде $x > 0$; $R = x$, теңдеу (4.32) төменде келтірілгендей болады

$$T_{(R)} = \frac{q}{2\pi\lambda R} \cdot e^{-vR/a}. \quad (4.34)$$

Әрдайым $e^{-vR/a} < 1$ болатындықтан, жылу көзі неғұрлым тез қозғалса (v өссе) немесе температура өткізгіштік коэффициентің (a) шамасы неғұрлым төмен болса (металға тәуелді), соғұрлым жылукөзі алдында температура айқын төмендейді.

Температураның $уу$ өсі бойынша, яғни жылу қозғалу өсіне перпендикуляр бағытта таралуын (дене oz өсі бойынша жартылай шексіз) теңдеу (4.32) де $x=0$ деп болжамдап шығаруға болады.

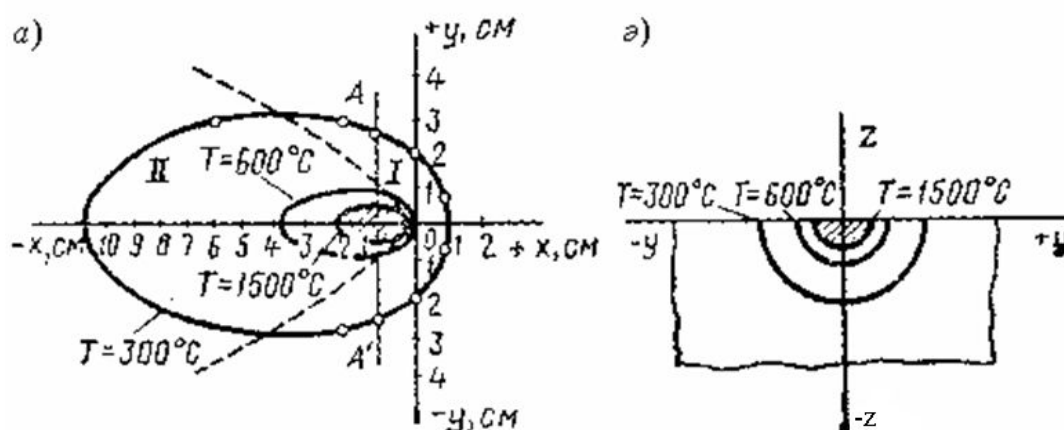
$$T_{(R)} = \frac{q}{4\pi\lambda R} \cdot e^{-vR/2a} \quad (4.35)$$

Оу өсінде берілген R қашықтықта температура тең теріс таңбалы OX өсінің сондай қашықтығындағы коэффициент $e^{-vR/2a} < 1$ -ға көбейтіндісіне тең. $e^{-vR/2a} > e^{-vR/a}$ болғандықтан температураның Оу және Oz өсінің оң таңбалы бөлігінде төмендеуден баяу өрбиді.

Жоғарыда келтірілген формулалармен шоғырланған жылжымалы жылу көзімен қыздыруда денедегі кез келген нүкте температурасын уақыт кезінде есептеу мүмкін.

Жартылай шексіз өрісте изотерма айналыс денесі тұлғалы болатындықтан, xx өсіне перпендикуляр қимада изотерма жартылай шеңбер сипаты, радиусы y координатына тең $z = 0$ жазықтығында.

Изотерманың айтылғандай сипаттамасы 4.13-суретте келтірілді.



4.13-сурет. Жартылай шексіз денеде xx өсіне перпендикуляр қимада изотерма:

$a - AA'$ қимада, $y = y_{1500 \max}$; $б - көлденең қима$

Егер AA' қимасы максимальды температура $\sim 1500^\circ\text{C}$ өтсе, yy координатында максимальды температура 1500°C , бұл аумақ штрихпен ерекшеленді.

Температура өрісін графо-аналитикалық тәсілмен өлшем бірлігісіз параметрлер арқылы есептеу әдістемелері бар.

Пісіру өндірісінің дамуында жылу көздерінің қуаты және пісіру жылдамдығы өсуде. Сондықтан шекті жағдайлар $q \rightarrow \infty$; $v \rightarrow \infty$; $q/v = \text{const}$ тән температура өрісін анықтау қажеттілікті.

Жартылай шексіз денені аса қуаты тез қозғалысты жылу көзімен қыздыру аталған шарттары ескеріп (4.32) теңдеуден шығарылады.

Жылу көзі тез (үлкен жылдамдықпен) қозғалғанда оның алдында жылу таралуы болмайды. xx өсі бойында жылу көзі соңында жылу таралуы жылу көзінің жылдамдығына тәуелді емес, сондықтан жылу xx өсіне перпендикуляр бағытта таралды. Жоғарыда келтірілген талдауға сәйкесті (4.32) теңдеуді құбылту нәтижесінде төменде келтірілген теңдеу шығарылады.

$$T_{y_o, z_o, t} = \frac{q}{2\pi\lambda vt} \cdot e^{-r_x^2/4at} \quad (4.36)$$

4.4. Тілме металл қалыңдығын толық балқытып қыздыруда температура өрісі

Қалыңдығы δ тілме металды сызықты жылу көзімен қыздырудағы квазистационарлы температура өрісін қарайық. Жылу көзі z өсінде келтірілген, жылу металл қалыңдығында біркелкі таралған.

Теңдеу (4.30) 0-ден ∞ шегінде интегралдап және баламалы параметрлерді орнына қою нәтижесінде үздіксіз әсер етуші сызықты жылжымалы жылу көзімен тілме металды қыздыруда температура теңдеуі шығарылады.

$$T_{(r,x)} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \cdot e^{-vr/2a} \cdot K_o \left(r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right), \quad (4.37)$$

мұндағы r – қозғалысты өріс элементінің жазықтық радиус-векторы, яғни берілген нүктенің жылу көзінің лездік орнынан арақашықтығы; $K_o \left[r \sqrt{v^2/(4a^2) + b/a} \right] = K(U)$ Бессель функциясы екінші қатарлы нөл ретті жорамал аргументтен. Мұндай функцияның U шамасымен алынған мәні кестеленген.

Тілме қалыңдығында температура өрісінің изотермалары бірқалыпты өзгеріссіз.

Тілмеде сызықты жылу көзінен жылу таралу процесі жартылай шексіз денеде нүктелі жылу көзінен жылу таралудан сандық мәнді айырмашылықты.

Қозғалыссыз жылу көзімен қыздыруда теңдеу (4.37)-де $v = 0$ деп алып температура теңдеуі шығарылады.

$$T_r = (q/2\pi\lambda\delta) \cdot K_o(r\sqrt{b/a}) \quad (4.38)$$

Формула (4.38)-ге сәйкес температура тек радиус-векторға тәуелді. Изотермиялық беттер цилиндр, оның өсі жылу көзімен үйлесулі. Жылу көзінен қашықтаған сайын температура төмендейді. Функция $K(U)$ өзгеруіне сәйкесті, $r \rightarrow \infty$ жағдайында температура нөлге ынталанады.

Жылжымалы жылу көзінде тілмеде температура таралуы созықталған изотермалармен сипатталады. Тілмеде температура таралуының жартылай шексіз денедегіден айырмашылығы O_x өсінің теріс таңбалы жартысында жылу көзінің қозғалыс жылдамдығына тәуелді. Металдың жылу өткізгіштік коэффициенті төмен болған сайын, изотерманың жоғары температуралық (1600°C -тан жоғары) аумағы кең болып келеді. Мысалы, төменкөміртекті болаттың жылу өткізгіштігі $0,09$ кал/см·с $^\circ\text{C}$, хромникелді легирленген аустенитті болаттың жылу өткізгіштігі $0,06$ кал/см·с $^\circ\text{C}$. Сондықтан бірдей балқыған аумақ қалыптастыру үшін (бірдей қалыңдықты тілме пісіруде) жоғарыда аталған легирленген болат үшін жылу көзінің қуаты төменкөміртекті болатты пісірудегіден төмен болуы керек.

Алюминийдің жылу өткізгіштігі ($0,65$ кал/(см·с $^\circ\text{C}$)), мыстың жылу өткізгіштігі ($0,90$ кал/(см·с $^\circ\text{C}$)) темір, төменкөміртекті болаттардан елеулі жоғары. Сондықтан бұл металдарды пісіруде жоғары температуралық қыздыру аумағы ықшамды (енді емес) изотерма алу үшін жылу көзінің қуаты болатты пісірудегіден жоғары және жылу ағыны металл бетіне неғұрлым шоғырланып келтірілуі керек.

Электрдоғасы мен пісіруде, ереже параметрлерінің төмен көміртекті болаттарды қыздыруда шекті күйде температура өрісіне әсері төменде келтірілгендей. Бұл тұжырымдаулар изотермалар өзгерісін талдау негізінде жасалған.

Пісіру жылдамдығын өсіру жылу көзінің қуаты тұрақты жағдайында ($q = \text{const}$) жылу көзінің қозғалысына перпендикуляр бағытта изотерма енінің тарылуына және изотерманың қысқаруына алып келеді.

Пісіру көзінің қуаты — өсуі пісіру жылдамдығы тұрақты ($v = \text{const}$) жағдайда қыздырылған металл аумағының ұлғаюына алып келеді. Сәйкесті температуралар изотермасының мөлшері көлденең және ұзындық бағытында өседі.

Жік ұзындық бірлігіне (1 м) келетін энергия шамасы ($q/v = \text{const}$) тұрақты болғанда жылу қуатының өсу әсері пісіру жылдамдығы

әсерінен басымды. Жылу қуаты өскен сайын қыздырылған аумақ мөлшері өседі. Тілмеге температура өрісін сызықты жылу көзімен қыздыруда өлшем бірлігісіз параметрлер арқылы шешуге болады. Жоғарыда келтірілген жартылай шексіз денені нүктелі жылу көзімен қыздыруға сәйкесті (4.37) теңдеу арқылы.

Тілме үстіңгі бетінен жылу берілуін ескермесек теңдеу (4.37) қарапайымдатуға болады. Сонда

$$T_{(r,x)} = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \cdot e^{-vr/2a} \cdot K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) \quad (4.39)$$

$vx/(2a) = \alpha$ және $vr/(2a) = \rho'$ деп алсақ, онда $r = 2a\rho'/v$. Теңдеу (4.38) былайша жазылады

$2\pi\lambda\delta T/q = e^{-x} K_0(\rho')$. Бұл теңдеудің сол жағын өлшемсіз шама θ' деп алайық, яғни $\theta' = e^{-x} K_0(\rho')$. $x = r \cos\varphi$, сондықтан $\alpha = \rho' \cos\varphi$. Сонда $\theta = e^{-\alpha} K_0(\rho') = e^{-\alpha} e^{\rho'} e^{-\rho'} K_0(\rho')$. Осыдан қорытынды теңдеу шығады

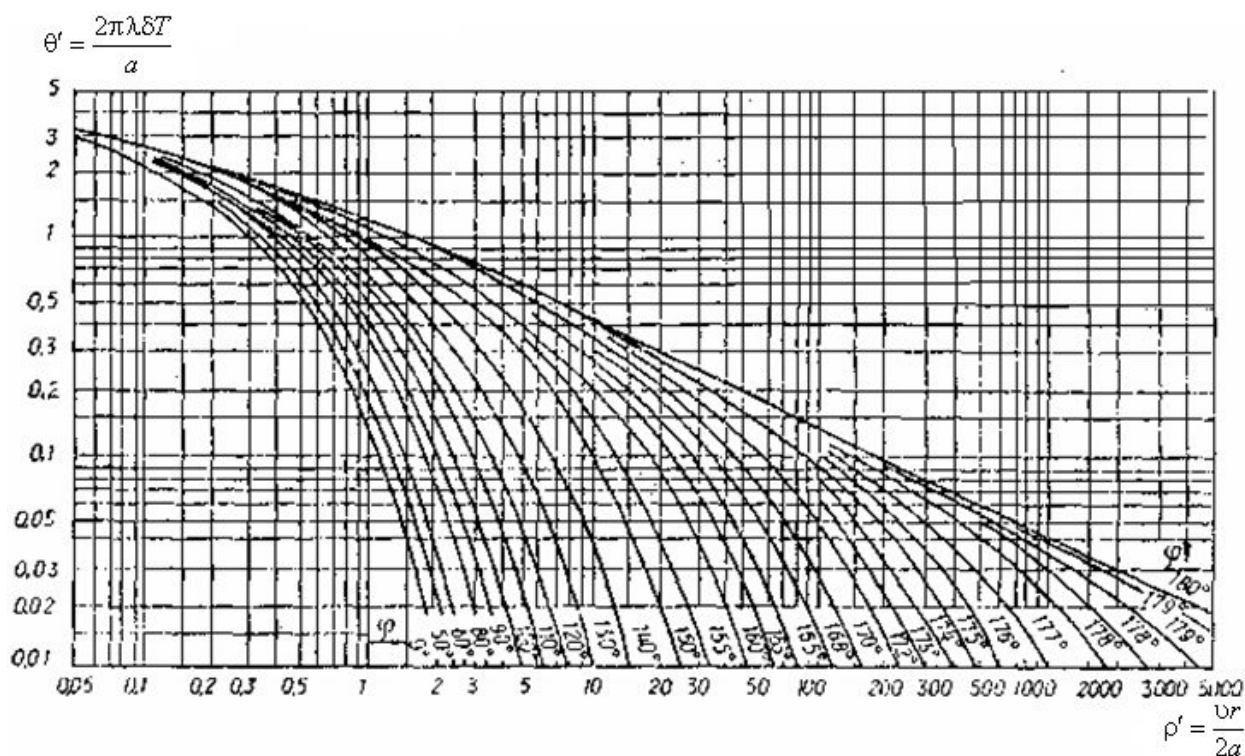
$$\theta' = e^{\rho'} e^{-\rho'(1+\cos\varphi)} \cdot K_0(\rho') \quad (4.40)$$

Бұл теңдеу жалпы көріністе теңдеу (4.35)-ке ұқсасты.

Шексіз ұзын тілмені сызықты қозғалысты жылу көзімен қоршаған ортаға жылу берусіз қыздыруда $\theta' = \int(\rho')$ түрлі температура өрісін есептеу номограммасы 4.15-суретте келтірілді.

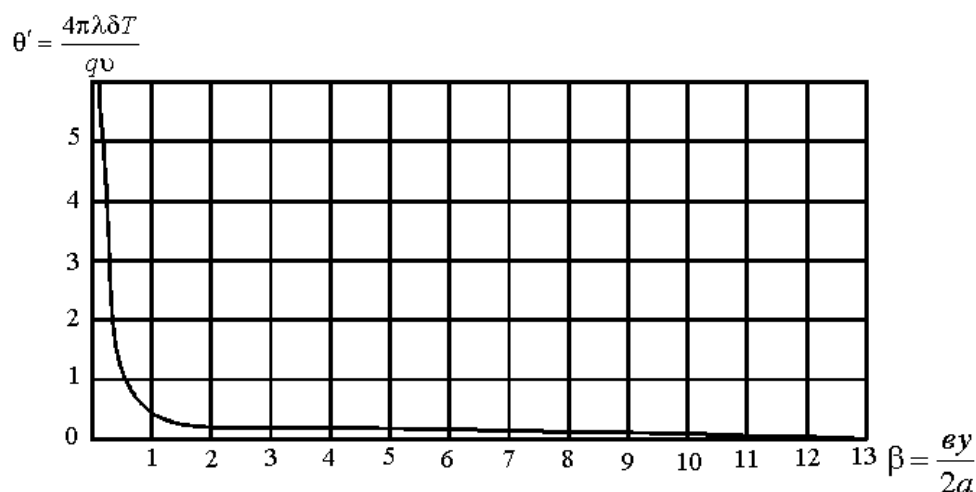
Аналогиялы көзқараспен теңдеу $2\pi\lambda\delta T/q = \int(vy/2a)$ шығарылады. Бұл теңдеуді T температураға дейін қыздырылған металл енін (көлденең мөлшерін) есептеуге қолданады. Сәйкесті номограмма 4.14'-суретте келтірілді.

Тілме металға қатынасты бүйір беттерден жылу алмасуды ескеру қажеттігі туады. Температура таралу процесінің сипаттамасы бұл жағдайда жартылай шексіз денеде жылдам қозғалысты нүктелі жылу көзінен жылу таралуына сәйкесті.



4.14-сурет. $\theta' = \int (\rho')$ түрлі температура өрісін есептеу номограммасы

$$\theta' = \frac{2\pi\lambda\delta T}{a} \quad \rho' = \frac{vr}{2a} \quad \beta = \frac{a\phi}{2a} \quad \theta' = \frac{4\pi\lambda\delta T}{qv}$$



4.14'-сурет. Белгілі T температураға қыздырылған металл енін анықтау үшін номограмма

Максимальды температура мәні жылукөзі қуатына тура пропорционалды және бірінші жуыктатылуда (денеден жылуберуді

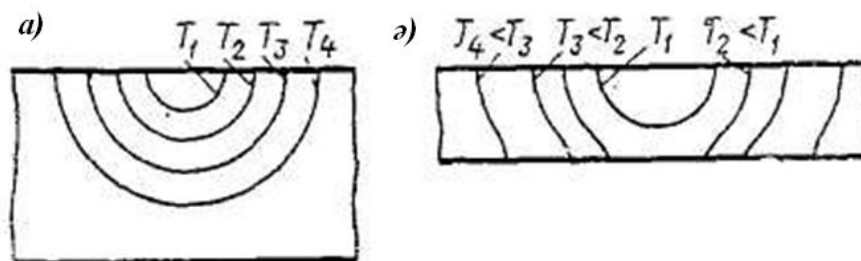
ескермегенде) берілген нүктенің жылукөзі қозғалыс өсінен қашықтық аралығына кері пропорционалды.

4.5. Жалпақ жұқа қабатты нүктелі жылукөзімен қыздыру

Жұқа жалпақ қабатта $z = 0$ бетке келтірілген жылу ағыны кеңістікті болып келеді, бірақ шекаралық беттерде бұрмаланады. Әдетте, мәселені қарапайымдату үшін жалпақ жұқа қабаттың $z = 0$ және $z = \delta$ (мұндағы δ – жалпақ тілме қалыңдығы) жылу өткізбейді, келтірілген жылу толығымен жалпы денеде қалады деп есептеледі.

Жартылай шексіз дене және жалпақ жұқа тілмеде нүктелі жылукөзінің әсерін жалпы салыстыру, жылукөзінің сипаттамасы және дененің жылуфизикалық қасиеттері бірдей (тұрақты) болғанда, жалпақ тілмеде жылу таралуы қиындатылатын көрсетеді. Жалпақ тілмеде жоғары температуралы аумақ ауқымды (үлкен), ал изотермалар қимасы радиусы тұрақты сфера пішінді болып қалыптаспайды.

Жартылай шексіз дене (а) мен жалпақ тілме (ә) көлденең қимасында изотермалар көрінісі 4.15 – суретте келтірілді.



4.15-сурет. Нүктелі жылу көзімен қыздыруда дене көлденең қимасында изотермалар таралуы:

а – жартылайшексіз денеде; ә – жалпақ жұқа тілмеде

Жалпақ тілмеде температура аралықтары аумағы үлкен боп келуі, изотермалардың сфералық пішіннен бұрмалануы, мол массалы және қалыңдығы орташа жалпақ табақ металды электрдоғалы бірнеше қабат жік салып пісіруде айқын сипатты көрінеді.

Жылу ағыны аналогиялы сұлбасын жартылай шексіз жалпақ тілмені шетінен бастап пісіруде температура өрісін анықтауда (мұндай жағдай бірқатар құрылымдары пісіруде орын алады) және жылукөзі жалпақ тілме шетіне жақын, оған параллельді қозғалыста

болғанда (жылу таралуы ені салыстырмалы тар жолақта орын алады) температура өрісін есептеуде қолданылады.

4.6. Жылуға қанығу және температура теңелу мерзімдері

Жоғарыда (2.3÷2.5)-те қозғалыссыз және жылжымалы жылу көздерінде шекті күй жылу температура өрісі қаралды. Жылжымалы жылу көзінде шекті күйге жету квазистационарлы өріс қалыптасуымен сипатталады, мұнда өріс өзгеріссіз жылу көзімен бірге жылжытуда болады. Мұндай шекті күй бірден қалыптаспайды. Мысалы, электр доғалы пісіруде бастапқы кезде доға жылуы салқын металға беріледі. Доға жалындауы барысында металл қыздырылуда болады. Бұл жағдайда жылу көзіне ұласқан қыздырылған аумақ мөлшері ұлғаяда болады. Берілген қыздыру ережесіне сәйкесті белгілі бір мерзімді белгілі бір температура T -дан жоғары қыздырылған аумақ мөлшері ұлғаймайтын болады. Сол кезде осы аумақ шекті күйге келді деп айтуға, яғни шекті күйлі аумақ деп айтуға болады. Әлбетте, жылу көзіне жақын ұласқан аумақта шекті күй ерте орын алады, жылу көзінен қашықтағы аумақпен салыстырғанда.

Жылу таралу процесінің шекті күйге (қозғалыссыз жылу көзінде стационарлы – жылжымалы жылу көзінде квазистационарлы) жету кезеңі жылуға қанығу мерзімі деп аталады. Бұл мерзімде дене кез келген нүктесінде, жылу көзіне (қозғалыссыз, жылжымалы) байланысты координатты температура $T(0) = 0$ -ден шекті күй температурасына дейін $T(\infty) = T_{\text{шк}}$, теориялық t_{∞} орын алатын өседі.

Координаттары (x, y, z) нүктеде температура $T(t)$ -ны жылуға қанығу мерзімінде ($0 < t < \infty$ болғанда) зерттелген шекті күй температурасы мысалы, формула (4.32) арқылы нүктелі жылу көзінде жартылай шексіз денеде; формула (4.37) арқылы сызықты жылу көзі жылу беруші тілмеде және қарастырылушы нүктеге қатынасты қосымша жылуға қанығу коэффициентін $\Psi(t)$ қолдану ыңғайлы.

$$T(t) = \Psi(t) T_{\infty} \quad (4.41)$$

Уақыт өтуінде жылуға қанығу коэффициентінің мәні бастапқы кездегі $\Psi(0)=0$ мәнінен шекті күйде 1-ге дейін ($\Psi(\infty)=1$) өседі. Бұл коэффициенттің уақыт өтуінде өсуі денедегі берілген нүктеде жылуға қанығу процесін сипаттайды.

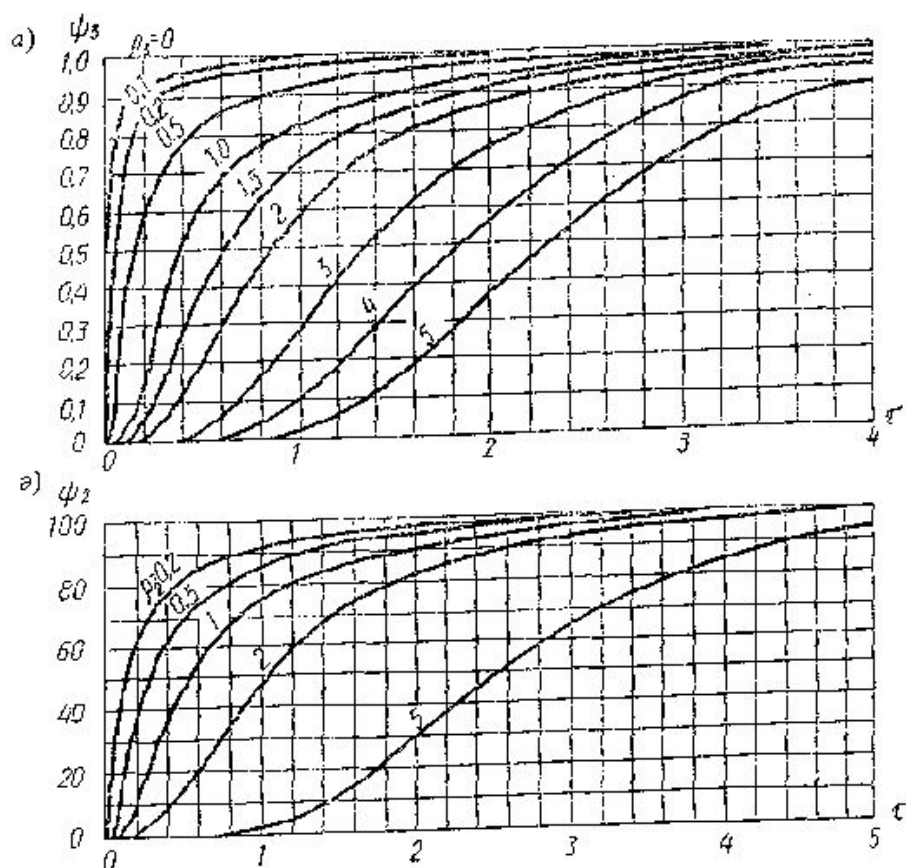
Коэффициент $\Psi(t)$ шамасы тек қана уақытқа тәуелді емес, ол сондай-ақ қарастырылушы нүктемен жылу көзінің арақашықтығына тәуелді, яғни $\psi = \int (Rt)$.

Коэффициент Ψ -ді есептеуді жеңілдету үшін қашықтық және уақыт өлшемсіз параметрлері енгізілген:

а) кеңістіктегі процестер үшін нүктелі жылукөзінен жартылай шексіз денеде жылу таралуында – қашықтық өлшемсіз критерийі - $\rho = \sqrt{R}/(2a)$; уақыттық өлшемсіз критерий $\tau = \sqrt{t}/(4a)$;

б) жазықтық процесте жылуберуші тілмеде сызықты жылукөзінен жылу таралуында – қашықтық өлшемсіз критерийі $\rho' = \sqrt{R}/(2a)$, уақыттық $\tau' = t[\sqrt{R}/(4a) + b]$.

Н.Н. Рыкалин есептеп шығарған жылуға қанығу коэффициенттерінің кеңістікті және жазықтық процестер үшін мәні 4.16-суретте келтірілді.



4.16-сурет. Ψ коэффициент мәндері:
а – кеңістіктегі; ә – жазықтықтағы процестерде

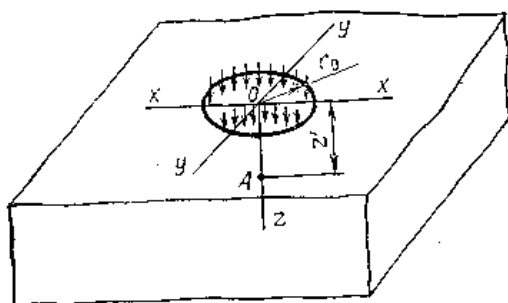
Жылуға қанығу мерзімінде сәйкесті температураны есептеу ретінде алдымен координаттары берілген нүктеде шекті күй температурасы (IV.32) және (IV.37) формулалар арқылы анықталады. Содан соң өлшемсіз критерийлер шамасын есептеп Ψ мәнін сәйкесті номограммалар арқылы 4.16, а) жартылай шексіз денеде кеңістіктегі өріс және (4.16, ә) тілмеде жазықтық өрісте анықтайды. Осыдан соң (4.41) формуламен жылуға қанығу мерзімінде температура есептеледі.

Жылу көзінің әсері тоқтатылған соң, денеде жылу өткізгіш болғандықтан жылу таралуы процесі өтуде болады. Жылу көзі әсері тоқтатылған кезден бастап жылу таралу процесі мерзімі температура теңелу кезеңі болып аталады.

4.7. Таралымды жылу көзінің температура өрісі

Жоғарыда келтірілген жағдайларда жылу көздері шоғырланған: нүктелі, сызықты (геометриялық сызықта шоғырланған) т.б. болып қарастырылды. Шын мәнінде пісіру жылу көздері дене көлемінде немесе үстіңгі бетінде таралымды болып келеді. Жылу көзінің таралымдығын ескеріп есептеу сұлбалары шоғырланған жылу көзі сұлбаларынан күрделі, сондықтан таралымды жылу көзі сұлбалары есептеулерде сирек қолданылады. Сонымен қатар есептеу әдістемелері ұдайы жетілдірілуде. Компьютер техникасы, компьютерлік үлгілеу тәсілдерін т.б. қолдану арқылы күрделі есептерді шешу әдістемелері өріс алуда. Сондықтан жас мамандар үшін пісіруде таралымды жылу көзінде температура өрісін есептеу негіздерімен таныс болу қажеттілікті.

Мұнда тек кейбір ережелер мен қарапайымдатылған есептеу формулалары келтірілді.



4.17-сурет.

Таралымды жылу көзі сұлбасы

Жартылай шексіз дене үстіңгі бетіне жылу көзі белгі ауданда әсер етеді және бұл ауданда жылу ағыны бірқалыпты таралымды деп алайық (4.17-сурет).

Oz өсі бойынша жылу таралуын қарайық. Oz өсінде жатқан нүкте A қыздырудағы орталық астында $z = z'$ координатында. Егер қыздыру көзі нүкте O да шоғырланған болса, онда

қашықтық $OA = R$ белгілі уақыт мерзімінде A нүктесінде келтірілген жылу шамасын, яғни температурасын анықтаған болар еді.

Жылу ағыны белгілі ауданда тарамдалған жағдайда, жылу ағыны орталық элементінен қашықтық R өз қалпында қалады. Жылуағыны ауданының орталықтан шет жылу ағыны элементтерінің өтетін қашықтықтығы $R' > R$ болады, сондықтан қарастырылған нүкте температурасы төмендеу болып қалыптасады. R' және R айырмашылығы нүкте A -да жылуағыны мен температураны анықтайды. Бұл айырмашылық қыздыру ауданы (дағы) мөлшеріне тәуелді, сондай-ақ z' -ке тәуелді.

Бұл тәуелдікте қыздыру дағының үлкеюі R' және R айырмашылығын өсіреді (күшейтеді), z' шамасының өсуі аталған айырмашылықты кемітеді.

Таралымды жылукөзімен қыздырылған дене көлемі температурасын T_t , шоғырланған жылукөзімен қыздыруда орын алатын температура $T_{ш}$ және қосымша коэффициент ε қолданып анықтау қолайлы. Коэффициент ε , бұл жағдайларда жылу таралу ерекшелігін ескеру коэффициенті.

Н.Н. Рыкалин z/z_o қатынасына тәуелді есептеп шығарған ε коэффициентінің мәндері 4.5-кестеде келтірілді.

4.5-кесте

Коэффициент ε мәндері

z/z_o	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0
ε	0,131	0,328	0,446	0,542	0,618	0,679	0,828	0,944	0,975	0,99

Бұл жағдайда денедегі қарастырылушы нүктеде таралымды жылукөзімен қыздыруда температура төменде келтірілген формуламен есептеледі.

$$T_t = \varepsilon T_{ш} \quad (4.42)$$

Мысалы үшін. Мол массалы дене төменкөміртекті болат пісіру доғасымен қыздырылады. Доға параметрлері $I = 220A$, $U_q = 20V$. Қыздырылатын дененің жылуфизикалық қасиеттері: $\lambda = 0,09 \approx 0,1$ кал/(см·с⁰С); $a = 0,08$ см²/с.

Шешуі. Доғаның анодтағы дағында ток тығыздығы $i = 500 \text{ А/см}^2$ (А.А. Алов, Г.Л. Петров келтірген көрсеткіштер). Сонда доғаның анод дағы мөлшері $F_q = 220/500 \approx 0,44 \text{ см}^2$; $r_o = \sqrt{0,44/\pi} = 0,36 \text{ см}$.

Доға жылу ағыны бірқалыпты таралмаған, жылу таралу заңдылығы нормалды таралу заңына жуық. Сонымен қатар доғаның қыздыру дағы мөлшері анод дағынан үлкен. Бұл түзетулерді есептеу сұлбасында еске алмауға болады. Доға қыздыру дағы анод дағына тең және жылу ағыны онда бірқалыпты (жылу көзі шеңберлі) деп аламыз.

Н.Н. Рыкалин түйіндемесі бойынша жылудағы ортасында $T_A = q/(\pi\lambda r_o)$.

$$T_A = 670/3,14 \cdot 0,1 \cdot 0,36 = 6000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$I = 200 \text{ А}$; $U_q = 20 \text{ В}$; $v = 0,1 \text{ см/с}$; $\eta = 0,7$; $q = 670 \text{ кал/с}$ деп алып Oz өсі бойынша температура таралуын есептеуге болады. $T = [q/(2\pi\lambda R)] \cdot e^{-vR/2a} [q/(\pi\lambda z)] \cdot e^{-vz/2a}$. $T = (1070/z) \cdot e^{-0,63z}$. Осы әдісте мен есептеген z өсі бойынша температура таралуы 4.6-кестеде келтірілді.

4.6-кесте

Шоғырланған және таралымды жылукөзімен
қыздыруда Oz өсінде жылу таралуы

z см	$\frac{1070}{z}$	$-0,63z$	$\lg e^{-0,63z}$	$e^{-0,63z}$	Нүктелі жылу көзінде температура $T_n, ^\circ\text{C}$	$\frac{z}{r_o}$	ε	Шеңберлі (айнымалы) жылукөзінде температура $T_t, ^\circ\text{C}$
0	∞	0	0	1	∞	0	0	6000
0,25	4380	-0,158	-0,068	0,87	3720	0,7	0,71	2600
0,5	2140	-0,315	-0,136	0,73	1560	1,4	0,9	1400
1,0	1070	-0,63	-0,272	0,53	570	2,8	0,97	550
2,0	535	-1,26	-0,567	0,27	144	5,6	0,99	142

Салыстыру да айқын көрсететіндей жылукөзі таралымды немесе шоғырланған болғанда температура шамасы елеулі айырмашылықты болады. Егер нүкте O -де шоғырланған жылукөзінде температура шексіз $T = \infty$ болса, қабылдаған таралымды жылу көзінде $T = 6000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

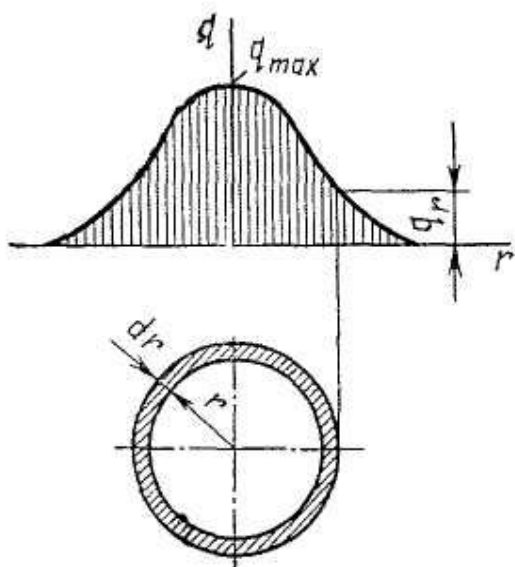
Қыздыру дағы ұлғайса температура есептелген шамадан да (6000°C) төмен болады. Нүкте O да z өсі бағытында қашықтаған сайын температура алшақтығы кемиді: $z = 1,0\text{ см}$ болғанда жылукөзі ерекшелігіне байланысты температура алшақты елеусіз деп айтатындай. $T_{ш} - T_m = 570 - 550 = 20^{\circ}\text{C}$

Балқу тереңдігі де (балқу температурасын $T_{бл} = 1500^{\circ}\text{C}$ деп алайық) өзгерісті болып келеді. Шоғырланған жылу көзінде $z_{бл.ш.} = 0,53\text{ см}$, ал таралымды жылу көзінде $z_{бл.т.} = 0,43\text{ см}$.

Шынайы жағдайға неғұрлым жақын сұлбаны қарайық. Газ жалыны мен электрдоғасында үлесті жылу ағыны $q(r)$ қыздыру дағы радиусы r бойынша бірқалыпты (нормалды) тараған болып келеді және $q_r = q_{\max} e^{-\hat{e}r^2}$ теңдеумен сипатталады. Нақтылы жағдайда $q_{\max}$ және q_i шамалары тәжірибелік өлшеумен және тәжірибелік шамаларды пайдаланып есептеумен анықталады. Шеңберлі қыздыру дағы, үлесті жылу ағыны шеңбер ауданында бірқалыпты таралған болып қалыптасуы газ жалыны және электрдоғасы өсі қыздырылу бетіне перпендикуляр болып бағытталғанда орын алады. Осындай жылу көзі бірқалыпты – дөңгелек жылу келтіруші боп аталады. Мұнда жылу көзінің жалпы қуаты q мен ауданы F шеңберде радиусқа байланысты үлесті жылуағынының таралуы $q(r)$ төменде келтірілген теңдеумен есептеледі.

$$q = \int_F q_{(x,y)} \cdot dF \quad (4.43)$$

Қыздыру дағында жылу таралуы 4.18-суретте келтірілгендей деп алайық.



4.18-сурет. Қыздыру дағында жылу таралу сұлбасы

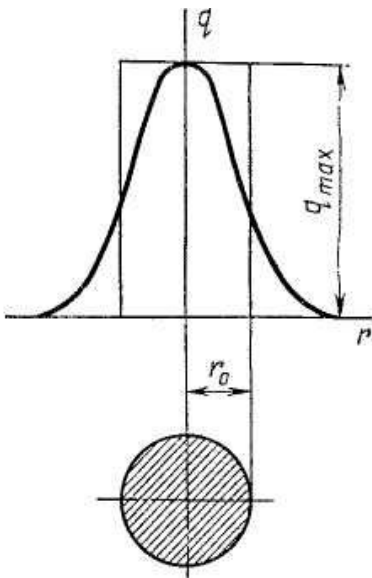
Радиусы r ені d_r сақиналы элементті қарастырайық. Осындай сақиналы элементте үлесті жылу ағыны $q(r)$ бірқалыпты тұрақты. Бұл сақина арқылы келтірілетін жылу шамасы $q(r)2\pi r \cdot dr$. Жылу таралу қисығы абсцисс өсіне ассимптотикалы жуықтаумен болады, интегралдау $r=0$ -ден $r=\infty$ аралығында алынуы керек. Іс жүзінде бір- қалыпты шеңберлі жылу таралуы тек радиус r шамасының нақтылы мәніне дейін орын алады. Шоғырлану коэффициент дұрыс анықталғанда жоғарыда айтылған жағдай есептеу нәтижесіне елеулі әсер етпейді. Сондықтан

$$q = \int_0^{\infty} q(r) 2\pi r dr \quad (4.44)$$

Теңдеуге $q(r)$ орнына оның шоғырлану коэффициенті арқылы берілген жалпы сипатталуын қойсақ, мұнда $\hat{e}r^2 = U$ деп сәйкесті $2\hat{e}rdr = dU$ алсақ, теңдеу өрнектелуі болады

$$q = \frac{1}{\hat{e}} q_{max} \pi \int_0^{\infty} e^{-U} dU = \frac{1}{\hat{e}} q_{max} \pi \int_0^{\infty} e^U dU$$

$$q = \left(\frac{\pi}{\hat{e}} \right) q_{max} \quad (4.45)$$



Егер дұрыс шеңберлі (дөңгелек) жылу көзі орына жалған (жорамалды) қуаты q жылу көзін алсақ және оның үлесті жылу таралуы радиусы r_0 шеңберлі десек, сонда r_0 шамасын геометриялық есептеулер арқылы шығаруға болады.

Негізінің ауданы πr_0^2 цилиндр көлемі үстіңгі беті үлесті жылу $q(r)$ ағынымен шектелген көлемге $q = \pi r_0^2 q_{max}$ тең. Осыдан $r_0^2 = q / (\pi q_{max})$ шығады. $q / q_{max} = \pi / \kappa$ деп алып (4.45) формуладан, анықтаймыз

$$r_0^2 = 1 / \hat{e}; \quad r_0 = 1 / \sqrt{\hat{e}} \quad (4.46)$$

4.19-сурет. Радиусы r_0 шеңбер жорамалды жылу таралу сұлбасы

Шоғырлану коэффициенттің k мәні неғұрлым жоғары болса, соғұрлым эквиваленттік цилиндр радиусы r_o шамасы төмен (аз) болады. Электрдоғасында шоғырлану коэффициентінің басымшылықты ықтималды мәні $1,5 < k < 6$, ал газ жалынында $0,16 < k < 0,4$ болып келеді. Көрсетілген шоғырлану коэффициенттеріне сәйкесті эквиваленттік цилиндр радиусы r_o -дің шекті мәндері: пісіру электрдоғасы үшін $0,4 \div 0,8$ см аралығында, газ жалыны үшін $1,6 \div 2,5$ см аралығында болып келеді.

Жоғарыда келтірілген талдаулар көрсеткендей, егер температура өрісін есептеуде электрдоғалы қыздыруды кей жағдайда шоғырланған жылу көзімен қыздыру деп қарасақ, онда қателік қыздыру дағымен салыстырмалы аумақта ғана, жылукөзі әсер еткен орынан ~ 1 см өрісте орын алады. Газ жалынымен пісіруде мұндай қателік шамасы үлкен, сондықтан мұнда температура өрісін есептеуде жылукөзінің таралымдығын ескеру керек.

V. ЖЫЛУЛЫҚ ЕСЕПТЕУДІ ПІСІРУ ПРОЦЕСІНДЕ ҚОЛДАНУ

Жылу таралу заңдылықтары пісіруде бұйымда температура өрісін есептеу тәсілімен анықтауға және пісірумен әртүрлі құрылымдарды өндіруде ұтымды технологиялық шешімдер табуға мүмкіндік береді. Дегенмен мұнда орын алатын ерекшеліктерде бар.

Пісіру ережелері металдың мөлшері және қасиеттеріне байланысты температура өрісі әртүрлі шамалы максимальды температураға қыздырылған металл аумағын, пісіруге жататын металдың әртүрлі көлемінде термиялық циклді $T = \int (t)$ анықтауға мүмкіндік береді. Есептеу формулаларын шығаруда жорамал, болжау, орынды ұйғарымдарға сәйкесті (жылу көзінен келетін ағынның шоғырлануы; жылу физикалық қасиеттерді температураға тәуелсіз деп алу; фазалық құбылыстар жылуының, балқу жылулығының ескерілмеуі) металдың жоғары температураға қыздырылған аумағы көлемін анықтауда елеулі ауытқулар орын алады. Мысалы, болатты электр доғалы пісіруде 700–800 °C төмен температурада есептелген изотермалар эксперимент арқылы анықталған изотермаларға қанағаттанарлық дәрежеде дәл келеді. Жоғары температурада (1200–1500 °C) есептелген изотермалар өлшеумен анықталған изотермалардан елеулі ауытқулы болып келеді. Сондықтан жоғарыда келтірілген есептеу сұлбаларына сәйкесті есептеумен анықталған пісіру ваннасының нұсқа пішіні нақтылы қалыптасқан пішінінен елеулі ауытқулы болуы мүмкін.

Сондықтан балқу температурасы изотермасын, бұл изотерма пісіру ваннасы нұсқа пішінін анықтайды, есептеуде орын алатын қателікті бағалау үшін тек жылу келтіру сұлбасы жеткізіліссіз, сонымен қатар балқу жылуының балқытылған металдағы $T = T_{\text{бл}}$ энтальпиясына тән салыстырмалы жылу әсерін ескеру керек. Мысалы, темір үшін балқу жылулығы $q_{\text{бл}}$ балқыған күйдегі энтальпиясының балқу температурасына қатынасты алғанда 20 % шамасында, яғни $(q_{\text{бл}} / \dot{Q}_{\text{бл}} = 0,2)$. Алюминийде бұл қатынас $q_{\text{бл}} / \dot{Q}_{\text{бл}} = 0,45$, яғни балқу жылулығы, бұл жылулық температура өрісін есептеу сұлбасында ескерілмейді, балқу температурасына қатынасты алынған балқытылған алюминий энтальпиясының жартысына жуық шамада. Сондықтан балқу

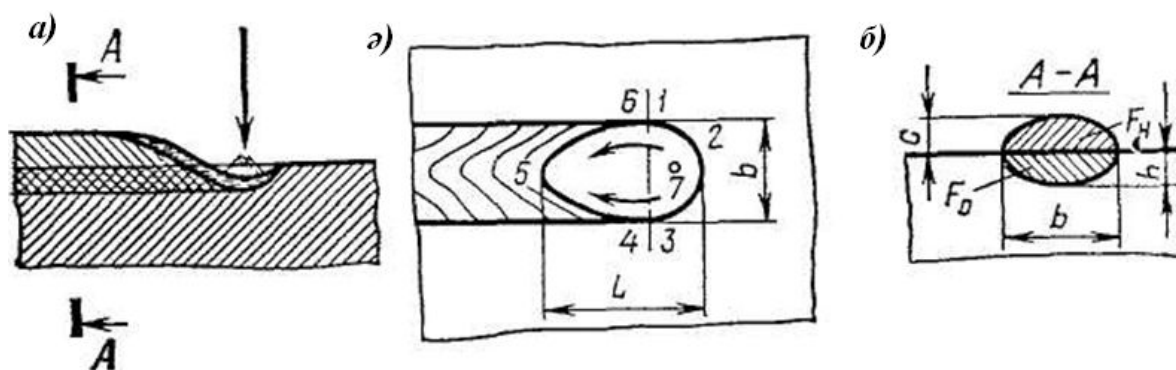
температурасы изотермасын есептеу сұлбасында қосымша эксперименталды анықталған коэффициенттер келтіріледі.

Болат және термиялық өңдеуге жататын алюминий қорытпаларын пісіруде металдың термиялық әсер аумағы есептеу тәсілдерімен жеткілікті дәлдікті дәрежеде жақсы анықталады. Қолданылатын есептеу әдістемелері аталған қыздыру аумағында термиялық циклінде максимальды қыздыру температурасын, суытылу жылдамдығын анықтауға мүмкіндік береді. Аталған қыздыру – суыту параметрлері термиялық әсер аумағында металл құрылымы мен қасиетін анықтайды. Жылулық есептеулер нәтижесінде, металл және қорытпалардың пісіру ережесі параметрлерінің оңтайлы шекті мәндері анықталады.

Пісіру процесінде температура өрісі бірқалыпты болмайтындықтан бұйымда деформация орын алады және ішкі кернеу қалыптасады. Температура өрісінің уақыт бойынша өзгеруін есептеу әдістемелері уақыт өтуінде орын алатын деформацияны есептеуге және кернеу эпюрін жасауға мүмкіндік береді. Бұл мақсатта жылулық есептеулерді қолдану арнайы курстарда қаралатындықтан, мұнда келтірілмеді. Жылу келтірудің кейбір ерекше тәсілдері – көпжалынды газжалыны, пісірудің ерекшелікті түрлері де келтірілмеді. Мұндағы қаралған мәселелер электрдоғасы және газжалынымен балқытып пісіруге қатынасты.

5.1. Пісіру ваннасы, металдың кристалдануы және жік металы қалыптасуы

Жылу көзінің әсерімен негізгі пісірілуші металл шағын аумақта балқытылады, яғни сұйық күйге көшеді. Изотермиялық $T = T_{\text{бл.}}$ бетпен, мұндағы $T_{\text{бл.}}$ металдың балқу температурасы, шектелген металл балқиды да, балқытылған металл-ванна қалыптасады, мұны пісіру ваннасы деп атайды. Балқытып пісіруде, әдетте, пісіру негізгі металмен бірге балқытылған электрод сым немесе арнайы қосымша металл қосылады. Бұларды балқытылған қосымша металл дейді.



5.1-сурет. Пісіру ваннасы және жік металы

Балқытылған қосымша металда қоршаған ортамен әсерлесу нәтижесіне белгілі өзгерістер болады.

Пісіру ваннасында (5.1 а, б-сурет), ваннаның алдыңғы шекті шебінен үнемі қосылып тұратын негізгі металл мен балқытылған қосымша металл араласуда болады. Пісіру жылу көзінің (оның орталығы 5.1 б-суретте нүкте 7 деп көрсетілген) пісіру бағытында жылжуы нәтижесінде пісіру ваннасы да осы бағытта жылжуда болады. Жылу көзінің соңында біршама қашықтықта температура төмендеуі ($T < T_{бл.}$) орын алып балқыған металл кристалдану процесі өтеді, металл қатты күйге көшеді. Ванна ені мен тереңдігінің ең жоғары шамасы (ваннаның бас жағымен соңғы жағының аралық қимасы) ваннаға негізгі жылу орталығынан біршама кейін болып келеді. Пісіру ваннасын оның бас жағы 1-2-3 және соңғы жағы 4-5-6 (VI б-сурет) деп қарастырады. Газ ағынының ал электр доғалы пісіруде электрлік күштер әсерімен жылу көзінің нақ астындағы балқыған металл үрленіп ығыстырылады да, балқыған металда жергілікті ойықтану орын алады, мұны кратер – пісіру шөгісі дейді. Бұл жағдайда балқыған металл ваннаның жоғары температуралы бас жағынан соңғы температура төмендеу жағына қарай қозғалады.

Кейбір жағдайларда ваннаға қож қосылуы орын алады. Қождың бір шамалы бөлігі ваннада қалқу, бату жағдайында болып, металмен қоса ваннаның соңғы жағына қозғалып, осы уақытта үнемі металмен әсерлесуде болады. 5.1, б-суретте металдың (қожбен қоса) қозғалыс сипаты нұсқағыштармен көрсетілді.

Ванна толық қатайған соң жік металы және үстіңгі бетте білікше қалыптасады. Жік металы пісіруде жік салу ретіне сәйкес бір немесе бірнеше қабатты болып келуі мүмкін. Үстіңгі бет білікшесі

балқытылып қаптастырылған қабат болып аталады (5.1 б-сурет). Балқытылып кристалданған металдың көлденең қимасын шартты түрде екі ауданға бөліп қарайды: балқытып қаптастырылған металл ауданы; негізгі металдың толық пісірілген ауданы (негізгі металл балқу қалыңдығы ауданы). Негізгі металл мен балқытылып қаптастырылған металл тығыздығы бірдей деп алайық. Жік металы қабаттарының тығыздығы тең болмауы да ықтималды. Бірақ жалпы жік металы көлемі шамалы, көлденең қима аудандары да кіші болатындықтан есептеуде елеулі қателік орын алмайды. Толық пісірілген негізгі металл көлденең қимасының ауданын F_o деп, балқытып қаптастырылған металл көлденең қимасының ауданын F_k деп алайық. Тығыздық тең болғанда, аталған қабаттардың жік металында үлесті шамасы көлденең қима аудандарының жалпы жік көлденең қимасы ауданына қатынасымен анықталады. Айтылғандарға сәйкес негізгі металдың жік металында үлесті шамасы γ төменде берілген формуламен есептеледі

$$\gamma = F_o / (F_o + F_e), \quad (5.1)$$

сонда балқытып қаптастырылған металл үлесі

$$(1 - \gamma) F_e / (F_o + F_e). \quad (5.2)$$

Негізгі металл толық балқытылған аумағы және балқытып қаптастырылған металдың (білікше) тұлғалық сипаттамалары да маңызды.

Толық балқытылған негізгі металл тұлғасы балқытылу тұлғалық коэффициенті $\psi_{ae} = b/h$ мен сипатталады немесе бұған кері шамамен, яғни h/b – салыстырмалы балқу тереңдігі коэффициенті арқылы, сондай-ақ балқыту толықтылығы коэффициентімен – $\mu_{ae} = F_o/bh$ сипатталады. Мұндағы b және h – сәйкесті балқыту ені және тереңдігі.

Балқытып қаптастырылған, яғни үстіңгі білікше тұлғасы – коэффициенті $\psi_a = b/c$ және білікше толықтығы $\mu_a = F_e/(bc)$ коэффициентімен сипатталады, мұндағы c – білікшенің максимальды биіктігі немесе жік нығайту шамасы деп аталады.

Жоғарыда ванна мен пісіру жігінің тұлғалық ерекшеліктеріне тоқталдық. Ванны толық сипаттау үшін ванна ұзындығының, оның ішінде ванна соңғы жағының ұзындығының мәні елеулі. Бұл мөлшердің жылукөзінің қуатына байланысты екені түсінікті.

Пісіру ваннасының, ванна металы қатайған соң жіктің барлық негізгі мөлшерін дәлмедеу есептеу әдістемелері жоқ. Бірақ жуықтатылған есептеулер пісіру бұйымында температура өрістерін IV-тарауда келтірілген есептеу сұлбалары арқылы жүргізіледі.

Жартылай шексіз денеде шоғырланған жылукөзімен қыздыруда жылу келтіру орнының соңғы жағында пісіру ваннасы ұзындығын L' (пісіру ваннасы ұзындығының L негізгі бөлігі) (5.3) формуламен есептеуге болады, мұндағы $R = L$ деп алсақ. Сонда

$$L' = q / (2\pi\lambda T_{\text{д.в.}}) \quad (5.3)$$

Нақтылы металға қатынасты λ және $T_{\text{бл.}}$ тұрақты шамалар. Сондықтан $L' = \hat{E}' q$, мұндағы $\hat{E}'$ - тұрақты коэффициент.

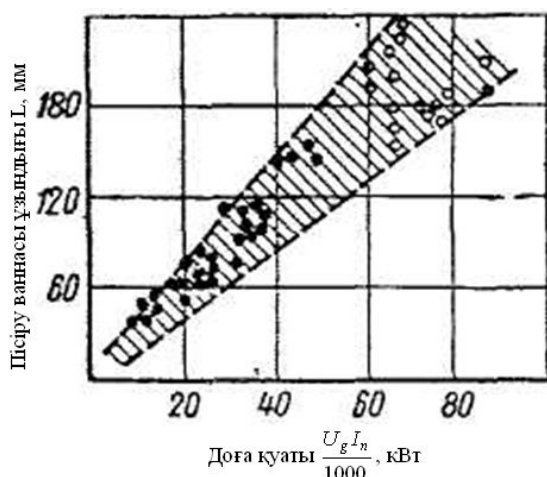
Электрдоғалы пісіруде жылу қуаты q пісіру тогы күші мен доға кернеуінің көбейтіндісіне пропорционалды.

Бұл жағдайда

$$L' = \hat{E} (I_n \cdot U_q / 1000), \quad (5.4)$$

мұндағы K – коэффициент.

$L = \int (I_n \cdot U_q / 1000)$ тәуелділігі Н.Н. Рыкалин, К.В. Любавский мен эксперименталды зерттелген және 5.2-суретте келтірілді.



5.2-сурет. Пісіру ваннасы ұзындығы L , мм мен доға қуаты, кВт арасындағы байланыстылық

Суреттегі штрихталған аумақ эксперименттік нүктелердің шашыраңқалуы көміртекті болаттарды электрдоғалы қолдан пісіруде $1,7 < K < 2,3$ мм/кВА, флюс қабаты астында автоматты пісіруде $2,8 < K < 3,6$ мм/кВа.

Пісірілген аумақ ені (5.5) формулаға сәйкесті $b = 2r$ десек, онда мол массалы денеде нүктелі жылукөзінде жік енінің жуықталған мәнін анықтау теңдеуі

$$b = 2\sqrt{2q(\pi e c \gamma v_n T_{\text{д.э.}})} = 0,968\sqrt{q/(c \gamma v_n T_{\text{д.э.}})} \quad (5.5)$$

Ванна ұзындығының L ванна еніне b қатынасы ванна тұлғалық коэффициенті $\varphi = L/b$ (5.3) және (5.6) формуладан анықталады

$$\varphi = \frac{1}{4\lambda} \sqrt{e c \gamma / (\pi v_n T_{\text{д.э.}})} \cdot \sqrt{q \cdot v_n} = A \cdot \sqrt{q \cdot v_n}, \quad (5.6)$$

мұндағы A – нақтылы металды пісіруге тән тұрақты коэффициент.

Жартылайшексіз денеде, нүктелі жылукөзінде балқу тереңділігі $h = b/2$. Сонда $b = 2h$. Осыдан $L = \varphi b = 2\varphi h$ болатындықтан шығарылады

$$h = q / (4\pi \lambda T_{\text{д.э.}} \varphi), \text{ яғни} \quad (5.7)$$

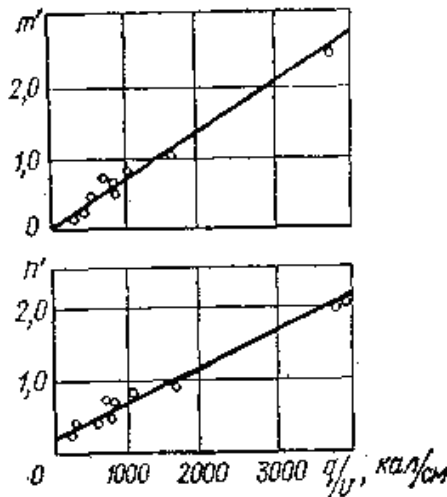
металдың балқытылу тереңдігі жылу қуатына пропорционалды.

Электрдоғалы пісіруде доға кернеуі аз шамалы шекте өзгертінін ескеріп, нүктелі жылукөзінің жартылайшексіз дене әсерінде металдың балқу тереңдігі (балқыған қалыңдық) пісіру тогы күшіне пропорционалды деп жуықтатылып алуға болады, $h = B \cdot I_n$.

Көміртекті және төменлегирленген болаттарды пісіруде әдетте коэффициент B шамасы $(1/80 \div 1/100)$ мм/А аралығында болып келеді.

Шоғырланған жылукөзінде оған жақын аумақты, мысалы $T = T_{\text{бл.}}$ аумақта, қолданылатын есептеу сұлбалары елеулі ауытқулар беруі мүмкін, әсересе балқу жылулығы жоғары металдар (алюминий, т.б.) үшін. Есептеу дәлдігін арттыру үшін арнайы түзету коэффициенттері n' және m' қолданылады. Бұл коэффициенттер есептелген балқу енін b , экспериментті анықталған мәнімен b ($n' = b/b'$), сәйкесті пісіру ваннасының соңғы жағының есептелген ұзындығының L_1 (5.1 ә-сурет, нүкте 4 немесе 6-дан нүкте 5-ке дейін) экспериментті анықталған

мәні L' мен ($m' = L_1/L'$) салыстыру арқылы шығарылған. Коэффициенттер n' , m' түзету коэффициенттері болып аталады. Аталған коэффициенттердің 1 м жік ұзындығына тән жылу қуатына q/v байланыстылығы 5.3-суретте келтірілді, мұндағы v пісіру жылдамдығы см/сағ., q/v , кал/см.



5.3-сурет. n' және m' коэффициенттерінің q/v , кал/см ға байланыстылығы

5.3-суреттен көрінетіндей жік ұзындық бірлігіне келтірілген q/v энергия шамасы орташа мәнді болғанда түзету коэффициенттерінің мәні елеулі әсерлі емес, сондықтан n' , m' коэффициенттерін қолданбай-ақ балқытылған аумақтың есептелген жуықты мөлшерін пайдалануға болады.

Аталған коэффициенттердің сандық мәні болаттар үшін $m' = 0.0007 q/v$; $n' = (0.00049 q/v + 0.2)$. Алюминий үшін түзету коэффициенттерінің шамасы жоғары: $m' = (0.0023 q/v + 0.6)$ және $n' = (0.00205 q/v + 0.8)$.

Негізгі металдың балқытылған (толық пісірілген) ауданын есептеу былайша негізделеді. Ауданы F_o аумақты балқу температурасына $T_{бл.}$ дейін қыздыру үшін қарышталатын жылу шамасы тең $F_o v_n \gamma h_{m_{\dot{a}e.}}$, мұндағы $F_o v_n \gamma$ — уақыт бірлігінде балқытылған негізгі металл массасы; $h_{m_{\dot{a}e.}}$ — металдың балқу жылуын қоса алғандағы үлесті энтальпиясы, кал/г; (Дж/кг). Пісіруде жылу қоршаған ортаға үздіксіз таралуда болатындықтан жоғарыда көрсетілген жылу шамасы бұйымға келтірілген жылу q шамасынан төмен және есептеуде $\eta_{бл.}$ арқылы толықтырылады

$$\eta_{\dot{a}e.} = F_o v_n \gamma h_{m_{\dot{a}e.}} / q \quad (5.8)$$

$\eta_{бл.}$ — балқытудың термиялық п.э.к. болып аталады. Сонда

$$F_o = \left[\frac{q}{v_n \gamma h_{m_{\dot{a}e.}}} \right] \eta_{\dot{a}e.} = \left[\frac{q}{v_n h_{v_{\dot{a}e.}}} \right] \eta_{\dot{a}e.}, \quad (5.9)$$

мұндағы $h_{v_{\text{дв.}}} = \gamma h_{m_{\text{дв.}}}$ – металдың балқу жылуын қоса алғанда балқытылған көлем өлшем бірлігіне тән үлесті энтальпия. Төменкөміртекті болат үшін $h_{v_{\text{дв.}}} = 2500 \text{ кал/см}^3$ немесе 10455 МДж/м^3 .

Балқыту термиялық п.э.к. $\eta_{\text{бл.}}$ есептеуде өлшемсіз критерий $\varepsilon_3 = q \cdot v_n / a^2 h_{v_{\text{дв.}}}$ енгізілген, аталған өлшемсіз критерий қолданып $\eta_{\text{бл}}$ шамасын балқыту тереңдігіне h/b қатынасты Н.Н. Рыкалин есептеулері негізінде құралған монограммалар бар.

Әдетті орташа ережелі электрдоғалы пісіруде $\eta_{\text{бл}} = 0,25-0,40$, яғни $25 \div 40\%$. Газжалынымен балқытып пісіруде $\eta_{\text{бл.}} = (2 \div 8)\%$, бұлай болуы газбен пісіруде жылу шоғырлануының төмен болуынан.

Балқытып қаптастырылған металл көлденең қимасының ауданы, уақыт бірлігінде балқытылған металл шамасымен анықталады.

$$m_{\kappa} = \gamma \cdot v_n \cdot F_{\kappa} \quad (5.10)$$

m_{κ} шамасы пісіруде негізгі металл және қосымша металл сипаттамасына, пісіру тәсілі мен ережесіне байланысты. Балқымалы электродпен электрдоғалы және электрқожды пісіруде m_{κ} шамасын анықтауда айқындылық жоғары. Аталған пісіру тәсілдерінде m_{κ} балқытып қаптастыру коэффициенті α_{κ} , $г/(А \cdot сағ)$ арқылы анықталады. Басым көпшілік жағдайда, балқытып қаптастыру коэффициенті α_{κ} экспериментті анықталады, ол I A ток күшімен 1 сағатта балқытып қаптастырылған металл массасы. Сонда

$$m_{\kappa} = I_n \cdot \alpha_{\kappa} / 3600, \quad (5.11)$$

мұндағы 3600 секундты сағатта аудару. Экспериментте уақыт секунд бірлігінде өлшенетіндіктен (5.10) және (5.11) теңдеулерден

$$F_{\kappa} = I_n \cdot \alpha_{\kappa} / (3600 \gamma v_n) \quad (5.12)$$

Пісірудің қосымша металл пісіру аумағына қолдан келтірілетін тәсілдерінде, қосымша металл балқытылуы жылу көзіне тікелей байланысты емес, қосымша металдың максимальды балқу шамасы жылукөзі қуатына тәуелді болғанмен. Бұл жағдайларда да балқытудың секундтық (сағаттық) өнімділігі экспериментті анықталады.

Алюминий-магний қорытпаларын, қосымша металл диаметрін $3 < d_c < 5$ мм аралығында алып, аргондоғалы пісіруде пісіру тогының

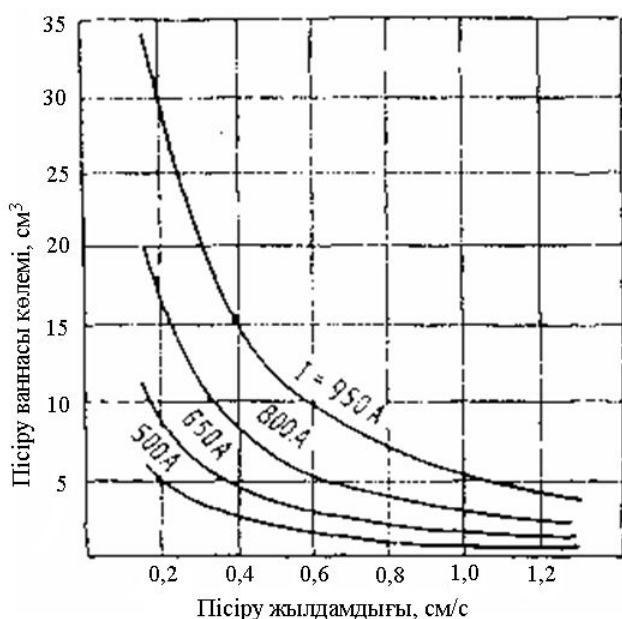
шамасын 140 А-ден 350 А-ге өсіргенде балқытып қаптастыру коэффициентін 0,6-дан 2 г/(А.сағ.)-қа өсіріледі. Көміртекті болатты ацетилен-оттек жалынымен пісіруде жалын қуатының өлшем бірлігіне (C_2H_2 дм³/сағ.) келетін балқытып қаптастырылған металл 0,001-ден 0,002г/дм³·сағ. аралығында болып келеді.

Ваннадағы металл көлемі мен металдың балқытылған күйде болу уақыты пісіру ваннасының маңызды көрсеткіштері қатарына жатады. Жылдам қозғалысты жылукөзінің температуралық тендеуін балқу температурасына $T=T_{бл.}$ келтіріп интегралдау арқылы В.И. Дятлов төмендегі тендеуді шығарды:

$$V_B = q^2 / (8\pi\lambda c \gamma v_n T_{дэ.}^2) \quad (5.13)$$

мұндағы V_B – балқытылған негізгі металл көлемі, см³.

Флюскабатының астында автоматты пісіруде пісіру ваннасы көлемінің пісіру тогы шамасымен пісіру жылдамдығына байланысты өзгеруі 5.4-суретте келтірілді.



5.4-сурет. Пісіру ваннасы көлемінің пісіру тогы күшіне және пісіру жылдамдығына байланыстылығы

Ванна металы көлемінің сұйық күйде болу уақыт ұзақтығы біркелкі емес. Негізгі металмен ұласқан шекаралықта балқыған металл тез кристалданады, лезде деп айтарлықтай жылдамдықпен. Бұл аумақ ені аз, жұқа кристалданған қабат, оны қорытпалану аумағы дейді. Себебі балқыған металдың негізгі қатты күйдегі металмен бастапқы ұласып қатаюы, қорытпалануы болғандықтан. Қорытпалану

шекарасынан ванна орталығына қарай бағытта металдың сұйық күйде болу уақыты ұлғаюда болады. Ванның орталық аумағында металдың балқыған күйде болу мерзімі максимальды. Шартты алғанда бұл аумақ ванның алдыңғы шегінде (5.1-сурет, нүкте 2), ал ванна қатаюы ванна соңына (5.1-сурет, нүкте 5) келеді.

Балқытылған металдың ваннада сұйық күйде болуының максимальды уақытын төмендегі формуламен есептеуге болады .

$$t_{\max} = L/v_n \quad (5.14)$$

Ванна металының қоршаған ортамен өзара әсерлесуін бағалауға ванның сұйық күйде болуы мерзімінің (уақытының) орташа ұзақтығы қолданылады. Орташа балқыған күйде болуы уақыты пісіру ваннасында

$$\bar{t}_b = V_o / (v_n F_o) \quad (5.15)$$

мұндағы $\bar{t}_b$ – ванның балқыған күйде болу орташа уақыты; V_o – балқытылған негізгі металл көлемі.

Жылдам қозғалысты жылукөзінде (5.13) және (5.9) формулаларды қолданып (5.16) формула шығарылады.

$$\bar{t}_b = \frac{qh_{v_{\dot{a}\ddot{e}}}}{8\pi\lambda c\gamma T_{\dot{a}\ddot{e}}^2 v_n \eta_{\dot{a}\ddot{e}}} = \frac{h_{v_{\dot{a}\ddot{e}}}}{8\pi\lambda c\gamma T_{\dot{a}\ddot{e}}^2} \cdot \frac{q_n}{\eta_{\dot{a}\ddot{e}}} \quad (5.16)$$

мұндағы $q_n = q/v_n$ – пісіруде ұзындық бірлігіне келтірілген жылу энергиясы, кал/см.

Орташа уақыт $\bar{t}_b$ металдың жылуфизикалық қасиетіне, жік ұзындық өлшем бірлігіне келетін энергияға және балқыту термиялық п.э.к.; өз кезегінде $\eta_{\text{бл.}}$ жылукөзінің сипаттамасына, тәуелді. Төменкөміртекті болатты пісіруде

$\bar{t}_b = \frac{1}{2700} \cdot \frac{q_n}{\eta_{\dot{a}\ddot{e}}}$, балқымалы электродпен электрдоғалы пісіруде $0,25 < \eta_{\text{бл.}} < 0,4$;

$$t_{\dot{a}} = (0.0010 \div 0.0015) q_n .$$

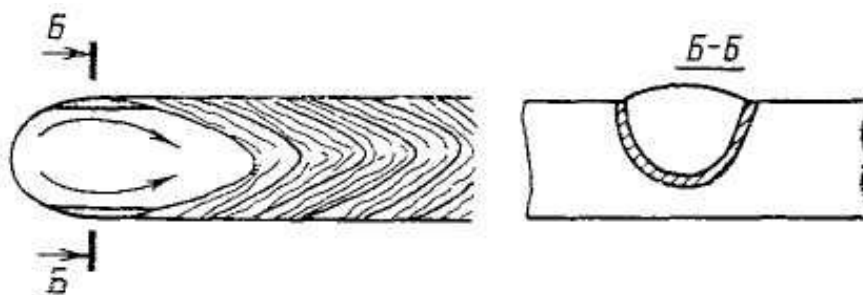
Ванның орташа температурасын әрқалай температуралы сұйық заттардың араласу ережесі бойынша бағалауға болады. Пісіруге қатынасты ваннаға $T=T_{\text{бл.}}$ температурада келтірілетін негізгі металл үлесін γ , ал қосымша металл үлесі $(1-\gamma)$, температурасы $T=T_{\text{қ.м.}}$ деп алуға болады. Сонда ванна орташа температурасы келесі формуламен есептеледі

$$\overline{T_b} = \gamma \cdot T_{\text{бл.}} + (1-\gamma)T_{\text{қ.м.}} \quad (5.17)$$

Мысалы, балқытып қаптастыру, металл жиектерін қиғаштап қимай түйістіріп флюс қабаты астында автоматты төменкөміртекті болатты әдетте ережелі пісіруде $\gamma = 2/3$; $T_{\text{бл.}} \approx 1500^\circ\text{C}$ – негізгі металл балқу температурасы, $T_{\text{қ.м.}}=T_{\text{к}}=(2300\div 2500)\approx 2400^\circ\text{C}$, мұндағы $T_{\text{қ.м.}}$ электрод катод болғанда ваннаға тамшыланған металл температурасы. Сонда $\overline{T_b} = \frac{2}{3}1500 + \frac{1}{3}2400 = 1800^\circ\text{C}$. Эксперименттік көрсетулерде 1770°C . Аталған болатты балқымалы электродпен қолдан пісіруде $\gamma \approx 0,35$; $T_{\text{қ.м.}}=T_{\text{к}}=(2100\div 2300)\approx 2200^\circ\text{C}$; $\overline{T_b} = 0.35 \cdot 1500 + 0.65 \cdot 2200 = 1955^\circ\text{C}$. Эксперименттік өлшеулерде (Д. Чипмен және Н. Христенсон жүргізуінде) 1950-ден 2000 $^\circ\text{C}$ -қа дейін.

Пісіру ваннасында бірқатар физикалық процестер, атап айтқанда балқытылған негізгі металл мен қосымша металл араласуы, металл мен қождың бөлінуі (ерекшеленуі) және металдың кристалдануы, сонымен қатар металдың қож және газ фазамен әсерлесуі орын алады. Біз мұнда химиялық процестерге тоқталмаймыз.

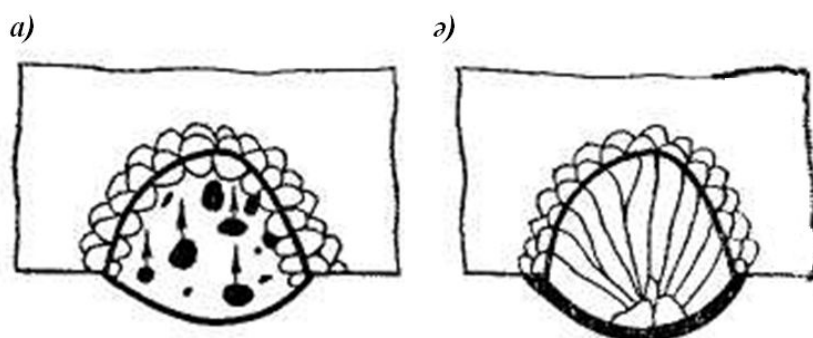
Балқытылған негізгі металл мен қосымша металдың физикалық араласуы ванның орталық аумағында айтарлықтай тез өтеді, себебі мұнда сұйық металл ағыны едәуір қарқынды. Қорытпалану шекарасында қатайған металл сұйық металл ағынын бәсеңдетеді; сондықтан бұл аумақта диффузиялық фактор әсері басымдылықты, сұйық металл атомдары ванна орталығынан шетіне қарай, шетінен орталыққа қарай өтімділікті қозғалысқа келеді. Бұл аумақта балқытылған негізгі металмен ванна орталық аумағындағы сұйық металдың араласуы жеткілікті толық емес, осындай ваннада сұйық металдар араласуы жеткіліксіз аумақ 5.5-суретте штрихпен көрсетілді.



5.5-сурет. Пісіру ваннасында сұйық металл араласу сұлбасы.
Араласу жеткіліксіз аумақ штрихпен көрсетілді

Ваннада металл мен қождың өзара бөлінуі және газдардың ваннадан көпіршіктеніп бөлінуі орын алады. Бұл процесс қож, газдардың коагуляциялану және тығыздығының металл тығыздығынан төмен болуынан, ванна үстіңгі бетіне қалқып шығуы нәтижесінде өтеді. Газ атомдарының молекулалар аралық шекараларда қозғалу мүмкіндігі де жоғары. Қож молекулаларының ванна, қатайған жік металы үстіңгі бетіне шығуына оларды ванна түбінен және бүйір керегелерінен өсіп келе жатқан кристалдар фронтының ығыстыруы «итеріп шығаруы» зор ықпал етеді.

Пісіру ваннасындағы қожды «итеріп шығаруы» процесінің орын алатыны және зор мәнді екені төбеде пісіруде айқын көрінеді. (5.6-сурет).



5.6-сурет. Төбеде пісіруде қождың жік металы бетіне шығарылу сұлбасы:
а – сұйық ваннада; ә – ваннада кристалдану аяқталған соң

Егер қож және металл бөлінуі олардың тек тығыздығына сәйкесті өтетін болса, онда төбеде пісіруде металдан жеңіл қож жоғары шығып жік түбірі аумағында бөлінген болар еді. Шынай жағдайда олай емес, қож жік металының үстіңгі бетінде, кеңістікте

төменде шоғырланады. Оның себебі ванна алдының түбірінен, бүйірінен кристалдар маңдай алдының өсуі қожды төмен қарай «итеріп шығаруында».

5.2. Кристалдану процесінің негізгі заңдылықтары

Барлық металл мен қорытпалар қатты күйінде кристалл денелер және олардың құрылымы мен қасиеті осы кристалдығымен анықталады. Металл өндіру, өңдеу технологиясында, олардың тобына пісіру технологиясы да жатады, металдың сұйық күйден кристалдануы орын алады. *Кристалдану – дегеніміз металдың сұйық күйден қатты күйге өтуіндегі бірінші құрылымы қалыптасу процесі.* Қыздыру процесінде әр металға тән нақтылы температурада $T_{\text{бл}}$ металл қатты күйден сұйық күйге өтеді, мұны металдың балқытылуы, ал сәйкесті температураны **б а л қ у т е м п е р а т у р а с ы** деп атайды. Салқындау барысында температура төмендеп $T_{\text{бл}}$ болғанда металл кристалданып, қатты күйге өтеді. Мұнда атомдар белгілі арақашықты, белгілі ретпен орналасады да нақтылы пішінді кристалл қалыптасады, мұны кристалл торы дейді. Кристалл торында жеке атом орналасқан орын-кристалл түйіні. Кристалл торының пішіні және онда атомдар орналасу заңдылықтары жалпы алғанда металдың кристалдық құрылымы болып аталады. Металдың айрықша сипатты қасиеттері кристалдық құрылымға тән ерекшелікпен анықталады. Кристалл торындағы атомдардың валенттік электрондары атомнан бөлініп, тордағы барлық атомдарға ортақ қозғалысты күйге келеді де кристалл торында атомдар аралық байланыс күші қалыптасады. Сыртқы әсерлер (механикалық күш, температура, қысым өзгеруі т.б.) салдарынан атом аралық қашықтық ұлғайса, атомдар аралық байланыс күшін қалыптастыратын қозғалысты электрондар болғандықтан, атомдардың байланыстылығы күрт үзілмейді, дене созымталдық қасиет көрсетеді. Атомдар аралығында қозғалысты электрондар болуы электр тогын өткізгіштік, жылу өткізгіштік, сәуле шағылыстыру қасиеттерінің жеткілікті жоғары болуына оң ықпал етеді, тіпті қамтамасыз етеді деп айтуға болады. Жоғарыда келтірілген кристалдық құрылым ерекшеліктеріне орай металдар созымтал, электр өткізгіштігі, жылу өткізгіштігі жоғары, түсті заттар.

Кристалл торында атомдар аралық қашықтықтығы бірдей емес. Осыған орай кристалдардың қасиеттері барлық бағытта бірдей емес. Қасиеттері барлық бағытта бірдей емес денелер – анизотропты болып аталады. Мұның металдың кристалдануында бірінші құрылым қалыптасуына зор әсерлі мәні бар.

Сұйық (балқытылған) күйден металдың кристалдануы өтуінің шарттары бар. Сұйық металда кристалдар орталығы пайда болады да олар өседі. Таза металл өзіне тән температурада балқиды $T_{бл.}$ және суытылуда осы температурада кристалданады $T_{к.}$, яғни $T_{бл.} = T_{к.}$. Заттың (металдың) бір күйден екінші күйге ауысу температурасын сындық температура деп, температура шамасы нақты тұрақты болғандықтан сындық нүкте деп те атайды.

Балқыған металл көлемінде кристалдану орталығы қалыптасуы және өсуі үшін қатты күй бастапқы сұйық күйден энергиялық тиімді болуы керек. Осындай энергиялық тиімді жағдай орын алуы балқу температурасынан төмен салқындатуда – аса салқындатуда орын алады. Немесе сұйық дененің жылуөткізгіштігі жоғары, қатты салқын денемен ұласу бетінде орын алады. Мұнда қатты дене беті (мысалы, құю қалпының балқыған металмен жанасқан үстіңгі беті) балқытылған металды аса суытушы және кристалдану орталығы болып табылады. Бұл жағдай балқытып пісіруде пісіру ваннасы металының толық балқытылмаған негізгі металл беттерімен ұласқан аумақта орын алады.

Кристалдану процесі өту үшін температураның сол аумақта балқу температурасынан төмен болуы шарт, сонда ғана кристалдану орталығы пайда болып және кристалл өсуі өріс алады. Аса суыту дәрежесі металл сипаттамасына және суыту жылдамдығына байланысты.

Кристалдану нәтижесінде біршама энергия бөлінеді – кристалдану жылуы, сандық шамасы балқу жылулығына тең. Бұл жылулық әдетте, қатты және сұйық денелер шекарасында, температурасы төмендеу қатты денеге тарайды. Жылу таралу қарқындылығы қатты және сұйық денелер шекарасындағы температура градиентіне және қатты, сұйық денелердің жылуфизикалық қасиеттеріне тәуелді. Қатты денеде (кристалл орталығы) dt уақытта қалыңдығы dY кристалл қабат өсуі үшін фазалар аралық шекарада жылу ағындарының белгілі байланыстылығы орын алуы шарт.

$$G_{\dot{a}\dot{e}} \cdot \gamma \cdot dY = [\lambda_{\kappa} (\partial T_{\kappa} / \partial y) - \lambda_c (\partial T_c / \partial y)]_{y=\gamma} dt, \quad (5.18)$$

мұндағы $G_{\dot{a}\dot{e}}$ – кристалдану жылуы, балқу жылуына тең; γ – металл тығыздығы; λ_{κ} , λ_c – сәйкесті қатайған және сұйық металдың балқу температурасында жылу өткізгіштігі; $\partial T_{\kappa} / \partial y$ және $\partial T_c / \partial y$ – сәйкесті қатты және сұйық металда температура градиенті, фазалар аралық шекарада, оған перпендикуляр y өсі бойынша.

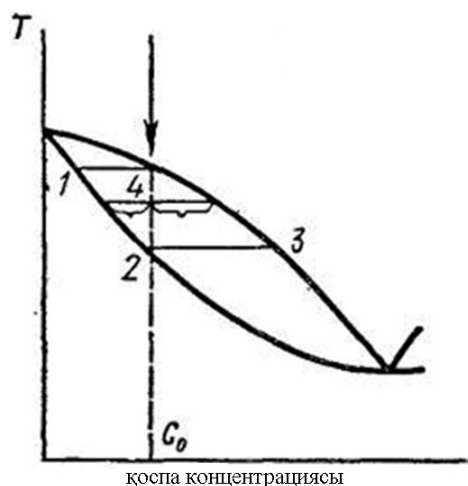
Шойын қалыпта болат құйманың кристалдануында балқыған металдан жылу тартылуда болады. Қатайған қабат өсу жылдамдығы қалып керегісінен 0,5 см қашықтықта 0,05÷0,1 см/с, ал қалып керегісінен 5-20 см қашықтықта 0,008-ден 0,010 см/с аралығында.

Таза металл кристалдануында оның құрылымы кристалдану орталығы пайда болуы және кристалдар өсу жылдамдығы шарттарымен анықталады. Суыту жылдамдығының өсуі ұсақ түйіршікті құрылым қалыптасуына, суыту жылдамдығының төмен болуы ірі түйіршікті құрылым қалыптасуына алып келеді. Қатайған металл құрамы барлық көлемінде бірдей болып келеді.

Қ о р ы т п а л а р к р и с т а л д а н у ы тұрақты температурада емес, біршама температура аралығында (ауқымында) өтеді. Қатты фазаның тізбекті ұлғаюы жағдайында, қатты және сұйық фазалар аралығында қосфазалы аумақ болады, мұнда бір уақыт мерзімінде қатты және сұйық фазалар орын алады. Бұл қосфазалы аумақтың ені солидус (толық қатайған) және ликвидус (толық сұйық) температура аралығына және аумақтағы температура градиентімен анықталады. Қосфазалы аумақта пайда болған және өсіп келе жатқан кристаллиттерден басқа жаңа кристалдану орталықтары пайда болуы ықтималды. Бұл орталықтар сұйық фазада өздігінен қалыптасушы немесе қосымша сипатты болуы (баяу балқитын қосымша модификатор бөлшектер, кристаллит – түйіршіктердің жарқышактары) мүмкін.

Қорытпалардың кристалдану процесінде қалыптасқан қатты фазаның көлемдік аумақтарының құрамы әртүрлі болып қалыптасады. Бұл кристалдануындағы *ликвация* болып аталады. Ликвация себебі қорытпа әртүрлі қоспалардың сұйық және қатты фазаларда ерітіндіде болуы әрқалай болуында.

Тепе-теңдік күй диаграммасында екі құрамды жүйеде (қорытпа негізгі элемент – қосымша элемент) бастапқы концентрация c_0 нүктеге дәл сәйкес деп алайық (5.7-сурет).



5.7-сурет. Қорытпа кристалдануында ликвация орын алу сұлбасы

Ең алғашқы кристаллиттер құрамы солидус сызығында нүкте 1-ге сәйкес болады. Температура солидусқа дейін төмендегенде, нүкте 2 қалдықты сұйық фаза құрамы нүкте 3-ке сәйкесті болады. Ликвидус пен солидус аралығындағы нүкте 4-те қатты фаза және сұйық фаза мөлшерлерінің қатынасы рычаг ережесімен анықталады.

Сұйық фазада температура градиенті кемісе, кристалдану орталығынан кристалдар тарамдалып (ағаштың бұтақтары сипатты)

өседі, мұны дендриттер дейді. Кристалдар өсу жылдамдығы төмен (аз) болса, (орташа кристалдану жылдамдығы $\bar{v}_e \rightarrow 0$) сұйық фазадағы орташа мәнінен артық қоспалар кристалдану фронтынан (маңдай алдынан) сұйық фаза көлеміне өтіп үлгереді, сұйық фаза қоспаларға бай түседі. Сондықтан жалпы көлем жекеленген аумақтарының құрамы, бастапқыдан елеулі ауытқулы болады.

Егер кристалдану жылдамдығы жоғары болса және сұйық фазада температура градиентті төмен болса, онда қоспа элементтер кристалдану маңдай алдынан қашықтап үлгермейді. Жекеленген аумақтарда қорытпа құрамы бастапқы құрамға жуық болып қалыптасады. Шынайы жағдайда, елеулі массалы күймаларда да, кристалдану жылдамдығы жоғары болып келеді. Сонда қоспалардың диффузия арқылы әлі кристалданбаған ортаға өтуі толық орын алмайды. Балқыған металл көлемі лезде кристалданса, қатайған қорытпада ликвациялық құрам бірдей болмауы орын алмайды.

Сонымен қатар кристалдану жылдамдығы төмен $\vec{V}_k \rightarrow 0$ жағдайда қатайған металдың жоғары температурада болу уақыты салыстырмалы жоғары. Сондықтан қатайған аумақта диффузиялық процестер өтуде болады да, көлем аумақтарының құрамы ортақ мәнге теңестірілу бағытында өзгереді. Шекті жағдайда қорытпа құрамы көлемдік бірдейлікке келеді. Қоспалардың кристалдану маңдай алдынан диффузиялық қашықтау жағдайында өткен кристалдану процесі – д и ф ф у з и я л ы қ деп аталады. Қоспалар диффузиялық қашықтаусыз қатайған көлем құрамы бастапқы құрамға сәйкес болып

қалыптасу жағдайында өткен кристалдану процесі – д и ф ф у з и я с ы з болып аталады.

Кристалдану жылдамдығы V_k біршама өскенде қатайғанда құрамдық ауытқу елеулі, сонымен бірге диффузиялық құрам теңестіру уақыты да азаяды. Сондықтан суытылған қорытпада көлемдік елеулі құрам бірқалыпты болмауы сақталады. Кристалдану жылдамдығы одан әрі жоғарылағанда қатайған металда көлемдік құрам алшақтығы кемиді.

Қатайған металда ликвацияға байланысты көлем аумақтық құрамының орта мәннен ауытқуымен (мұны аумақтық ликвация дейді) қатар қоспалардың дендрит өстері мен өстер аралығында біртекті болып тармалуы орын алады, мұны дендриттік ликвация немесе дендриттік біртектіліксіздік дейді.

Болат құймаларда ең жоғары ликвациялық құрам алшақтығы «қайнаған» болатта орын алады, себебі болаттың «қайнауы» диффузияны күшейтеді.

Жоғарыда келтірілген кристалдану заңдылықтары балқыған металдың қалыпқа құйылып кристалдануын зерттеулер арқылы анықталған. Пісіруде, әсіресе балқытып пісіруде балқыған металдың кристалдануы орын алады. Мұндағы айырмашылық пісіруде балқыған металл көлемі өте шағын. Балқыған металл негізінен балқытылмаған негізгі металға жылу таралуы арқылы суытылады. Пісіруде жылу көзінің әрекеті белгілі шамалы уақыт аралығында үзіліссіз және жылжымалы. Пісіруде металл қатаюы кристалдану процесі заңдылықтарына сәйкес өтеді, сонымен қатар технологиялық процеске сәйкесті ерекшеліктері бар.

5.3. Пісіру ваннасында металл кристалдану ерекшеліктері

Пісіруде балқыған металдың кристалдануы қалыпқа құйылған металдың кристалдануынан өзгешелікті болып келеді. Мұндағы негізгі айырмашылықтар:

- 1) пісіру ваннасында металдың кристалдануы ваннаға пісіру жылу көзінен жылу келтірілу жағдайында өтеді; кристалдану фронты (маңдайалды) пісіру жылу көзінің жылжуымен байланысты;
- 2) ваннада кристалдану орталығы шектеулі, олар негізгі металдың ваннамен балқылану шегінде, негізгі металл түйіршіктері түрінде болып келеді;

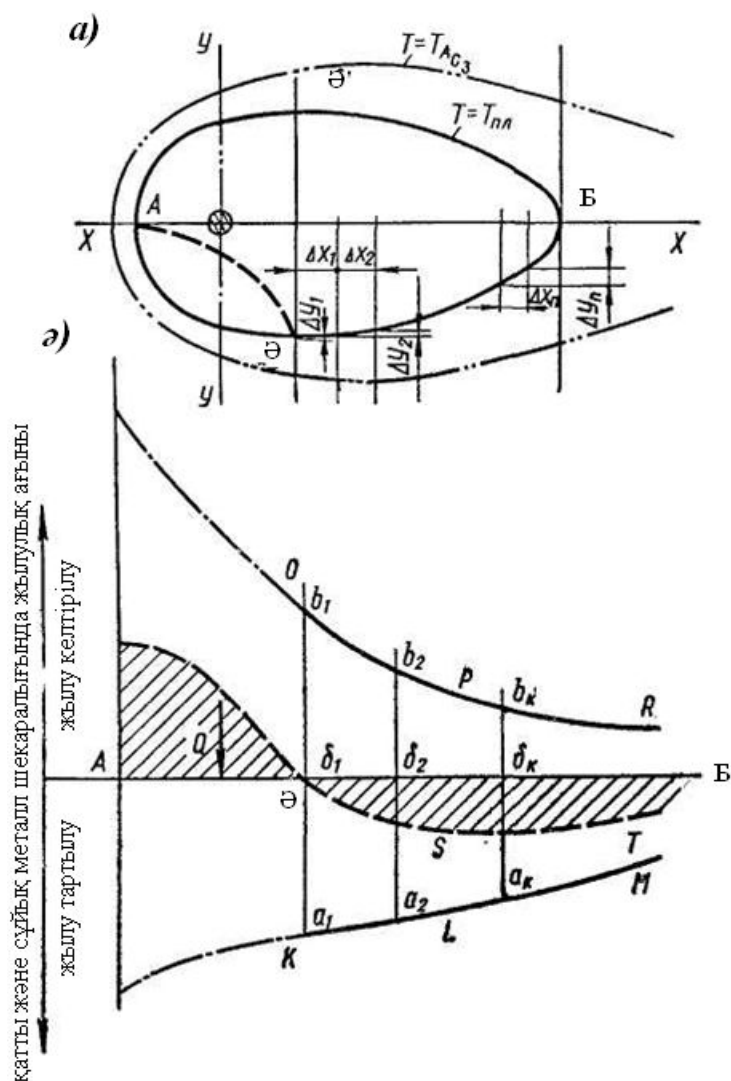
3) ваннада температура градиентінің елеулі шамада болуы; ванна орталық аумағында металдың аса қыздырылуы;

4) ванна металының айтарлықтай араласуы;

5) ванна көлемінің шамалы болуы, металдың балқыған күйде болу уақытының қысқалығы; металдың кристалдануында кристалдар өсу жылдамдығы орташа мәнінің жоғары болуы;

6) балқытып пісіруде негізгі металл және қосымша металдың құрамы бірдей болмауы жиі орын алады. Сондықтан пісіру ванна-сының аумақтарында бастапқы кезеңде құрамдары әртүрлі болып келеді.

Ванның шеттік жағынан кристалдану басталады. Ваннаға жылу келтірілуі, құйма қалыппен салыстырғанда, қорытпалану шекарасынан ванна орталығы бағытында.

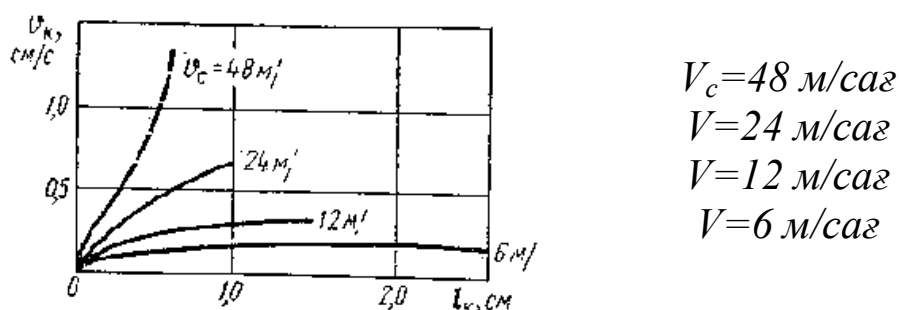


5.8-сурет. Пісіру ваннасына жылу келтіру және шығару аумақтар сұлбасы.

Кристалдар өсу жылдамдығының өзгеру заңдылықтарын түпкі бастамалықты өзгертеді. Кристалдану маңдай алдында қатты және сұйық фазалар шекарасында қатты денеге жылу тартумен қатар ванна жағынан жылу келтірілуі орын алады. 5.8 а-суретте келтірілгендей фазалар аралық шекараны АӨБ немесе АӨ'Б деп белгілеп, оны АӨБ-ға түзу сызыққа жайсақ (5.8 ә-сурет), онда Θ нүктесінен солға қарай ваннаның бас жағы болады, мұнда пісірілген металл жиектері балқытылады. Нүкте Θ -ден оңға қарай Б нүктесіне дейін ваннаның соңғы жағы, мұнда кристалдану өтеді, металл сұйық күйден қатты күйге ауысады. АӨ (АӨ') аумағында ваннаға жылу көзінен келтірілген жылу, қатты денеге тартылу жылуынан артық. ӘБ (Ө'Б) аумақта ваннадан қатты денеге тартылған жылу басымдылықты.

Пісіру ваннасында оның шетінде және ортасына қарай бағытталғанда кристалдар өсу жылдамдығының өзгеруі қалыптағы құймаметалдағыдан өзгешелікті. Пісіру ваннасында кристалдар өсу жылдамдығы сұйық – қатты фазалар шекарасында бастамалық қорытпалану аумағында минимальды. Қатаюдың ең соңғы бөлігінде ванна орталығында (жік орталығы) кристалдану жылдамдығы максимальды. 5.9-суретте флюс қабаты астында автоматты пісіру ережесінің кристалдар өсуі орташа жылдамдығына кристалдар ұзындығының l_e әсері келтірілді.

Кристаллиттер өсуінің орташа жылдамдығы кристаллит ұзындығын l_e кристаллит өсу уақытына t_e бөлу арқылы анықтасақ (ванна соңғы жағы ұзындығының пісіру жылдамдығына V_n қатынасы), онда электродағы пісіру ережесінің кең ауқымында 0,1-ден 0,4 см/с аралығында. Бұл көрсеткіш әдетті құймаметалда, монокристалдар өсуінде орын алатын кристалдар өсу орташа жылдамдығынан елеулі жоғары.



5.9-сурет. Кристалдар өсу жылдамдығының кристалдар ұзындығына L_e , см және пісіру жылдамдығына байланыстылығы

Егер ванна орталығында кристаллиттер өсу жылдамдығы пісіру жылдамдығына шамалас тең болса (әдетті, пісіру ережелерінде 0,2-ден 1,0 см/с шамалас), ал қорытпалану шекарасында кристаллиттер өсу жылдамдығы өте аз және шекарадан қашықтаған сайын өседі. Төменде 5.1-кестеде қорытпалану (сұйық-қатты фаза) шекарасына жуық аралықта кристаллиттер өсу орташа жылдамдығының мәндері келтірілді.

Кристаллиттер өсу жылдамдығынан көрінетіндей диффузиялық кристалдану (шамамен $V_e < 3 \cdot 10^{-2}$ см/с) жалпы көлемнің аз шамалы бөлігінде басталып кристалдануда, қорытпалану шекарасына жуық аралықта орын алады. Орталық аумақта (ванна орталығы) диффузиялықсыз кристалдану өтеді.

5.1-кесте

Орташа қалыңдықты болат тілмені электрдоғалы пісіруде есептеп шығарылған кристалдар өсу жылдамдығы

Болат түрі	Ұзындық бірлігіне келетін пісіру энергиясы, q , кал/см.	Орташа кристалдану жылдамдығы анықталған қорытпалану (ванна- негізгі металл) шекарасынан қашықтық, мм.	Кристалдар өсуінің жуықтатылған орташа жылдамдығы, см/с.
Аустенит класты хромникельді	2000	0-0,03	0,010
		0,03-0,10	0,025
		0,10-0,30	0,040
		0,30-0,80	0,120
Төменкөміртекті легирленбеген немесе төмен легирленген	2000	0-0,05	0,020
		0,05-0,12	0,050
		0,12-0,40	0,090
		0,40-1,00	0,200
	10000	0-0,01	0,005
		0,01-0,05	0,012
		0,05-0,12	0,017
		0,12-0,20	0,027

Бірнеше қабатты жік салып пісіруде (металл қалыңдығы жоғары) әрбір келесі балқытылып қаптастырылған білікше, алдыңғы қабат металын белгілі тереңдікте қайта балқытады. Астыңғы қабат металы үстіңгі балқытылған металдың кристалдануына негіз, төсем болып келеді, бұл мақсатты алдыңғы балқытып салынған металл білікшелері атқарады. Осындай көп қабатты жік металы көлденең қимасының макроысылмасында кристаллиттердің төменгі қабаттан ұласып жоғары қабатқа өскені көрінеді. Мұндай құрылым транс-кристаллит болып аталады. Транскристалитті құрылым суытылуда қайта кристалдану орын алмайтын, мысалы, бірфазалы аустенитті болат, мыс т.б., жік металында әдетті кездеседі. Пісіру ваннасында жаңа кристалдану орталықтарының пайда болуы, кристалдар өсу жылдамдығының басым бөлігінде, аталған орталықтан өскен кристаллиттер санының өсуіне, олардың қорытпалану шекарасынан өскен кристаллиттермен салыстырғанда елеулі болуына алып келмейді. Сондықтан металл құрылымын пісіру жігінде ұсақ түйіршікті етіп қалыптастыруға, әсіресе баяу балқитын металдарды пісіруде, мүмкіндік шектеулі болады.

Қосымша кристалдану орталығының пайда болуы ваннаның орталық аумағында, ванна соңғы шетіне (нүкте Б аумағында, 5.8 а-сурет) жуық аумақта ықтималдығы жоғары. Себебі бұл аумақта температура градиенті ең төмен, екі фазалы күй аумағының ені ең жоғары.

Кристалдануда бірінші құрылым қалыптасуына 1-текті модификаторлар қосу арқылы ықпал ету салыстырмалы жеңіл балқитын металдарды пісіруде нәтижелі болады. Алюминий қорытпаларын пісіруде жік металы құрылымын ұсақ түйіршікті етіп қалыптастыру *Ti* және *Zr* модификаторларын қосу арқылы жүргізіледі. (Модификация – түрөзгерткіштік, модификатор – түрөзгерткіш.) Кристалдануда құрылымның ұсақ түйіршікті болып қалыптасуына алып өтетін арнайы шағын мөлшерлі қоспалар. 1-текті модификаторлар – құрылымы кристалданушы қорытпаға изоморфты, баяу балқитын қоспалар. Баяу балқуына орай алғашқы болып кристалданады да, кристаллит түйіршіктері кристалдану орталығы болады, осылайша арнайы қоспалар арқылы металқұймада (ваннада) қалыптасқан кристалдану орталығы мәжбүрлі кристалдану орталығы деп атайды.

Болатты пісіруде модификациялауды қолдану қиындықты. Әсіресе электрдоғалы пісіруде балқытылған электрод материалының аса қыздырылуына байланысты, аса баяу балқитын модификатордың да белсенділігі төмендейді.

Кейбір пісіру жағдайында 2 - текті модификаторлар қолдану мүмкіндікті. Бұлар үстіңгі беттік-белсенділігі жоғары элементтер, сондықтан кристаллиттер үстіңгі бетін бүркемелеп, олардың өсуін тежейді. Нәтижесінде жаңа кристалдану орталықтары пайда болуына және өсуіне оңтайлы жағдай туындайды.

Қосымша кристалдану орталықтарын ваннаға серпімді тербелістер әсерімен қалыптастыруға болады. Осы мақсатта ваннаға белгілі қуатты ультрадыбыс тербелісін ендіру немесе ванна металын сыртқы магнит өрісімен араластыру тәсілдері қолданылады. Бұл тәсілдерді қолдануда, әсіресе екіншісін, техникалық қиындықтар бар.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Фролов В.В., Винокуров В.А., Волченко В.Н.: Парахин В.А., Арутюнова И.А. Теоретические основы сварки. М: Высшая школа, 1970.
2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов сварки. М: Машгиз, 1951.
3. Казимиров А.А. и др. Расчет температурных полей в пластинах при электрической сварке плавлением. Справочник. Киев. «Наукова думка», 1969.
4. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т.І. М.:Металлургия, 1968.
5. Петров Г.Л., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа , 1977.
6. Прохоров Н.Н. Физичесие процесс в металлах при сварке. Т.ІІ. М.: Металлургия, 1976.
7. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. Киев, В.Ш., 1976.
8. Ғ. Нысанбай. Металдарды пісіру және кесу. – Алматы: ҚазҰТУ, БО, 2001ж.
9. Ғ. Нысанбай. Плазменное напыление порошковых материалов. Алма-Ата, КазНИИНТИ, 1987.
10. Теория сварочных процессов под ред. В.В. Фролова. М., В.ш., 1988.
11. Сварка в машиностроении. Т.І. Под ред. Н.А. Ольшанского. М.: Машиностроение, 1978.
12. Фролов В.В. Физико-химические процессы в сварочной дуге. М.: Машгиз, 1954.
13. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Некоторые проблемы свариваемости металлов. М.:Машгиз, 1963.
14. Ғ. Нысанбай. Металдарды газбен пісіру және кесу. – Алматы: ҚазҰТУ. БО, 2011.

МАЗМҰНЫ

АЛҒЫСӨЗ	3
I. ПІСІРУ ПРОЦЕСІНІҢ ФИЗИКАЛЫҚ МӘНІ	5
II. ПІСІРУ ТҮРЛЕРІНІҢ ТОПТАСТЫРЫЛУЫ	17
2.1. Металдарды пісірудің негізгі түрлері	19
III. ПІСІРУДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ КӨЗДЕРІ	35
3.1. Химиялық энергия. Газ жалынымен пісіру (газбен пісіру)	35
3.2. Электрлідоға	46
3.3. Электртогының жылу қуаты	60
3.4. Электрқожды жылу көзі	65
3.5. Электронсәулелі жылулық көзі	67
3.6. Электрлідоғалы плазма	70
3.7. Үйкеліспен пісіру	71
3.8. Балқытып пісіруде әртүрлі жылулық көздері сипаттамасы	72
IV. ПІСІРУДЕ МЕТАЛДЫҢ ЖЫЛУЛЫҚ КӨЗДЕРІМЕН ҚЫЗДЫРЫЛУЫ	74
4.1. Жалпы түсініктер және пісіру шарттарына сәйкесті жылулық есептеулер.....	74
4.2. Жылу көздерімен металды қыздыруды есептеудегі негізгі сұлбалар	89
4.3. Мол массалы денені нүктелі жылу көзімен пісіруде термиялық есептеулер	105
4.4. Тілме металл қалыңдығын толық балқытып қыздыруда температура өрісі	108
4.5. Жалпақ жұқа қабатты нүктелі жылу көзімен қыздыру.....	112
4.6. Жылуға қанығу және температура теңелу мерзімдері.....	113
4.7. Таралымды жылу көзінің температура өрісі	115
V. ЖЫЛУЛЫҚ ЕСЕПТЕУДІ ПІСІРУ ПРОЦЕСІНДЕ ҚОЛДАНУ.....	121
5.1. Пісіру ваннасы, металдың кристалдануы және жік металы қалыптасуы	122
5.2. Кристалдану процесінің негізгі заңдылықтары	133
5.3. Пісіру ваннасында металл кристалдану ерекшеліктері	137
ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....	143

Оқулық басылым

ҒАБДУЛЛА НЫСАНБАЙ

**МЕТАЛДАРДЫ ПІСІРУ ПРОЦЕСІНІҢ ТЕОРИЯСЫ.
I. ФИЗИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ**

Оқу құралы

5B072400 – Технологиялық машиналар мен жабдықтар мамандығы
студенттеріне арналған

РБ бастығы	<i>З.А. Ғұбайдулина</i>
Редакторы	<i>А.И. Бейсебаева</i>
Компьютерде беттеген	<i>Л.П. Өмірбекова</i>

Басуға қол қойылды 14.05.2012 ж.
Пішімі 60x84 1/16. №1 баспаханалық қағаз.
Көлемі 9,1 есепті баспа табақ. Шартты баспа табақ 8,4.
Таралымы 300 дана. Тапсырыс №
Бағасы келісімді.

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық
университетінің басылымы,
Ақпараттық - баспа орталығы.
Алматы қ., Қ.И. Сәтбаев, 22

ISBN 978-601-228-337-2

