

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/QXJM4576>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,216

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажиева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magain Lapuerta – д.т.н., профессор (Сьюдад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич – д.т.н., доцент (Сафонов, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

***Э. С. Чукенова¹, Е. З. Нұман², А. Қ. Мустафа³,
Ф. Хошнау⁴, И. М. Дюсебаев⁵**

^{1,2,3}Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Де Монфорт университеті, Ұлыбритания, Лестер қ.;

⁵«Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3}«RnD Center» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4371-5989>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4467-1944>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8514-8300>

*e-mail: elvira_85-11@mail.ru

БЕЛСЕНДІ ЖӘНЕ ИНЕРТТІ ГАЗДАРДЫҢ WAAM ТЕХНОЛОГИЯСЫ АРҚЫЛЫ ӨНДІРІЛГЕН БОЛАТТЫҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ӘСЕРІ

Бұл мақалада сым доғалық аддитивті өндіріс (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM) технологиясында қолданылатын белсенді (CO₂) және инертті (Ar) қорғаушы газдардың ER70S-6 төменгі көміртекті болат дәнекерлеу сымынан алынған үлгілердің микроқұрылымына әсері жан - жақты зерттелді. Эксперименттік зерттеу барысында бірдей технологиялық параметрлерді оңтайлы қолданылып, тек қорғаушы газ түрі өзгертілді. Алынған үлгілерді алдын ала дайындап, оларға металлографиялық және микроскопиялық әдістермен кешенді талдау жүргізілді. CO₂ белсенді қорғаушы газ қолданылған үлгілерден феррит, перлит және цементит фазалары, ал Ar инертті қорғаушы газ қолданылған үлгілерден феррит, перлит, аустенит және мартенситтік құрылымдар анықталды. Сонымен қатар, аргон газы кеуектіліктің азаюына және құрылымының біркелкі болуына оң әсер ететіні көрсетілді. Бұл аргонның аддитивті өндіріс кезінде құйылған үлгінің балқыманың тұрақтылығына, қату процесіне және термиялық әсер ету аймағының сапасына оң әсер ететінін дәлелдеді. Зерттеу нәтижелері WAAM технологиясында қорғаушы газдың микроқұрылымдық қалыптасуға және дайын өнім сапасына әсерін нақты көрсетті. Бұл жұмыс болашақта жоғары сапалы, сенімді және ұзақ қызмет ететін металл конструкцияларын аддитивті әдіспен дайындауда газды дұрыс таңдаудың шеуіші рөл татқаратынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: аддитивті өндіріс, WAAM технология, болат, қорғаушы газ, микроқұрылым, кеуектер.

Кіріспе

Сым доғалық аддитивті өндіріс (Wire Arc Additive Manufacturing – ары қарай WAAM) күрделі геометриялы металл бөлшектерін қабаттап құюға мүмкіндік беретін, дәнекерлеу процесіне негізделген заманауи өндіріс әдісі. Дәстүрлі өндіру тәсілдеріне қарағанда бұл технология өндірістік циклді қысқарту, материал шығынын азайту және ірі габаритті құрлымдарды дайындау мүмкіндігі бойынша көптеген артықшылықтарға ие [1].

WAAM әдісі арқылы өндірілген болат үлгілердің сапасы көбіне доғаның ток күші, кернеу, қорғаушы газ түріне және жүру жылдамдығы сияқты технологиялық параметрлердің оңтайлы таңдалуына байланысты [2]. WAAM процесі бірнеше қабаттардың дәйекті түрде тұндырылуын қамтиды, бұл кезде әрбір параметр, әсіресе қорғаушы газдың түрі мен шығыны, алынатын құрылым сапасына тікелей әсер етеді. Қорғаушы газдың негізгі әсерлерінің бірі – балқытылған металл ваннасында газ кеуектерінің түзілу ықтималдығын азайту немесе арттыру. Мысалы, Агана және авторлар осы қорғаушы газ ағының жылдамдығын кеуекке қалай әсер ететінін зерттеді, газ ағының арттырған сайын кеуектің саны азайтатынын, бірақ қорғаушы газдың ағыны дәнекерлеу өлшемдеріне тікелей әсер етпейтінін айтты [3]. Бұл айтылған факторлар бүкіл құрамдас бөлікте пайда болатын микроқұрылымға айтарлықтай әсер етеді.

Сондықтан, болат материалының WAAM технологиясында қолданылған режимдердің болаттың ішкі құрлымына әсерін зерттеу өндірістің тиімділігі мен өнім сапасын арттыруда маңызды рөл атқарады [4]. Қазіргі таңда WAAM әдісін қолдану бойынша жүргізілген ғылыми зерттеулердің басым бөлігі жекелеген параметрлерге тоқталып, оларды жеке – жеке қарастырады. Әсіресе қорғаныс газының (белсенді немесе инертті) болаттың құрлымына әсері туралы кешенді әрі салыстырмалы зерттеулер аз [5]. Ішкі құрлымның қалыптасуына әсер ететін басты көрсеткіштердің бірі қорғаушы газының рөлін зерттеу – өндіріс процесін оңтайландырудың маңызды бөлігі болып саналады [6].

Көптеген ғылыми еңбектер аргон немесе көмірқышқыл газын стандартты параметр ретінде қабылдап, олардың құрылымдық ерекшеліктерге қалай әсер ететінін нақтыламайды [7].

Осы зерттеуде WAAM технологиясында белсенді (CO₂) және инертті (Ar) газдарды қолдану жағдайында болаттың микроқұрлымдық өзгерістерін салыстырмалы түрде зерттелді. Зерттеу барысында алынған үлгілер металлографиялық әдістермен талданып, белсенді немесе инертті газдар қолданылған кездегі дән өлшемі, айқындалған фазалар мен фазалар арасындағы айырмашылықтар анықталады.

Материалдар мен әдістер

Шикізат материалдары

Материал ретінде номиналды диаметрі 0,8 мм ER70S-6 маркалы болат дәнекерлеу сымы қолданылды. Субстрат ретінде 208×63×12 мм болат (Б3) пластинасын пайдаланылды. ER70S-6 маркалы болат сымының химиялық құрамы 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – ER70S-6 сымның химиялық құрамы (%) [8].

Сымның түпнұсқасы	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Fe
ER70S-6	0,07	0,85	1,43	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	Қалған үлесі

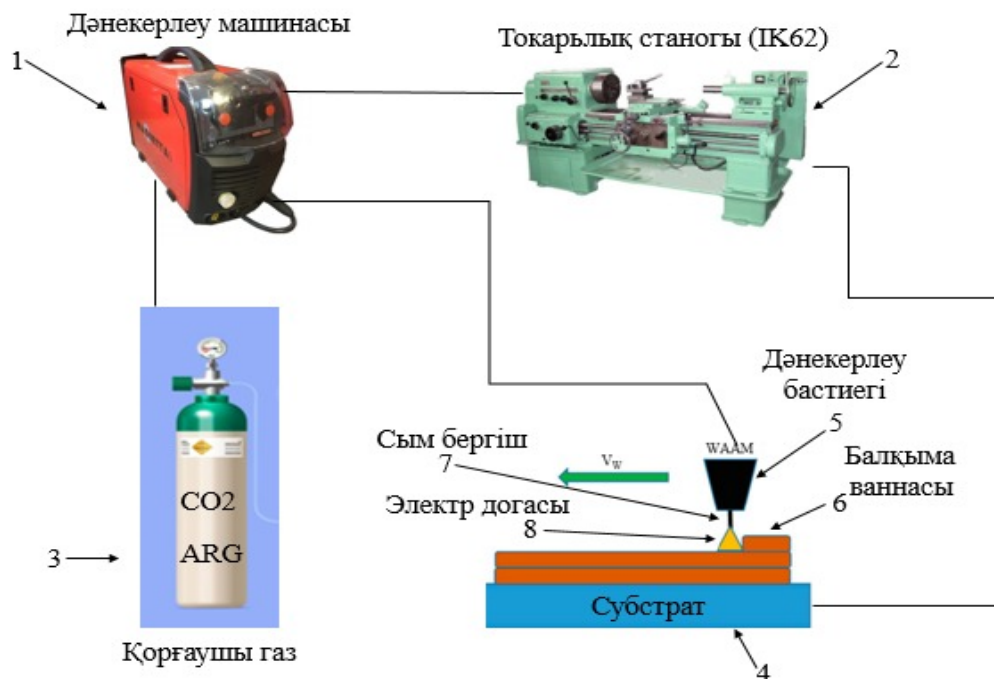
WAAM үлгілерін дайындау әдісі

Зерттеу барысында Magnetta 220 S металл инертті/белсенді газбен дәнекерлеу (MIG/MAG) аппараты пайдаланылды. WAAM технологиясы көмегімен үлгілерді дайындау үшін CO₂ және Ar қорғаушы газдар үшін бірдей технологиялық параметрлер, атап айтқанда, доға кернеуі, ток, қозғалыс жылдамдығы, сым беру жылдамдығы тағайындалды (2-кесте). Айырмашылғы тек қорғаушы газдарда болды, яғни қорғаушы газдар өзгергенде үлгілердің микроқұрылымы қалай өзгертіні зерттелді.

2-кесте – WAAM үлгілері үшін қолданылатын технологиялық параметрлер

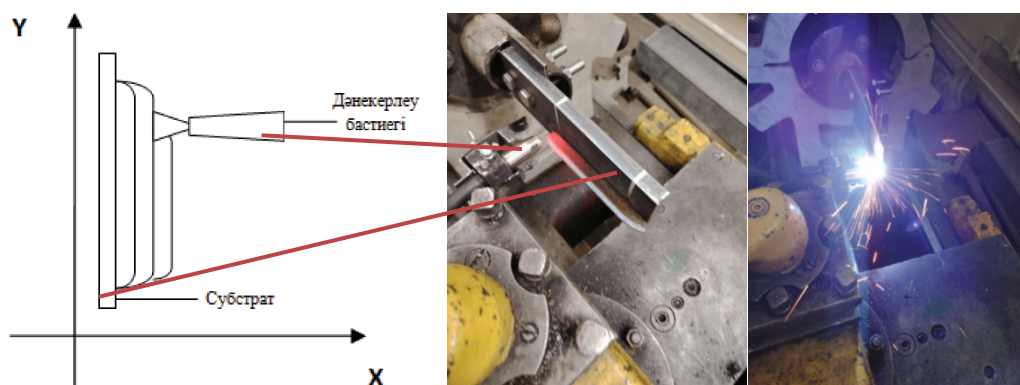
Басып шығу параметрлері	Мәндер, CO ₂ газы үшін	Мәндер, Ar газы үшін
Сымның диаметрі (мм)	0,8	0,8
Жүру жылдамдығы (мм/сек)	3,5	3,5
Сым беру жылдамдығы (м/мин)	3,0	3,0
Дәнекерлеу кернеуі (В)	14,8	14,8
Дәнекерлеу тогы (А)	53	53
Газ шығыны (л/мин)	18	18
Қорғаушы газ	CO ₂	Ar
Дәнекерлеу режимі	2Т	2Т
Тұру уақыты (сек)	15	15
Алынған үлгілердің биіктігі (мм)	2,4-2,5	2,7-2,9
Алынған үлгілердің қалыңдығы (мм)	0,48-0,50	0,48-0,50

Үлгілерді дайындау 1-суретте көрсетілген сұлбадағыдай жасалды. Сұлбада дәнекерлеу жүйесінен дәнекерлеу бастиегі арқылы субстратқа көлденең бағытта сымды электр доғасымен балқытып және қорғаушы газдардың көмегімен қорғап қабат-қабат үлгілер құйылды, автоматты қозғалмалы ІК62 токарлық станогына субстрат люнет арқылы бекітіліп эксперимент жүргізілді.



1-сурет – WAAM жүйесінің схемалық көрінісі

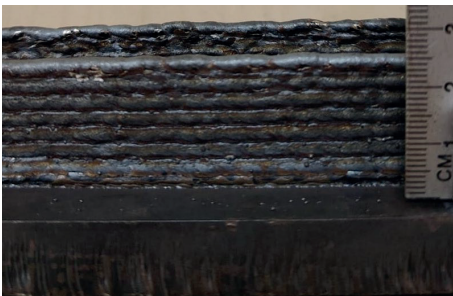
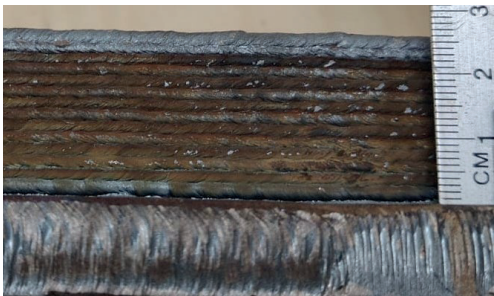
Қорғаушы газ ретінде 100 пайыз таза аргонмен (Ar) және 100 пайыз көмірқышқыл газын (CO_2) әр эксперимент үшін жеке – жеке қолданылды. Қорғаушы газдардың шығыны 18 л/мин болып тандалды, себебі бұл мән қол жетімді библиографиялық анықтамалардың көпшілігінде көрсетілген [9]. Әрбір қорғаныш газдарын пайдалана отырып бес үлгіден жасалды, әрбір үлгі 15 қатардан құю арқылы алынды, әрбір қабатты құю кезінде 15 секунд уақыт күтіп келесі қабат құйылды [10]. Сымды баспалау екі бағытта жүргізілді. Үлгілер көлденең бағытта 90 градустық бұрышпен баспаланды (2-сурет).



2-сурет – Металды қабаттап құю барысы

Алынған әрбір үлгінің биіктігі мен қалыңдығы өлшеніп параметрлер кестесіне енгізілді. Үлгілердің морфологиясы 3-кестеде салыстырып келтірілген.

3-кесте – (а) CO₂ және (b) Ar қорғаушы газдарын өзгерте отырып басып шығару үлгілерінің сыртқы көрінісін салыстыру

№ үлгі	CO ₂ қорғаушы газымен алынған үлгілер	Ar қорғаушы газымен алынған үлгілер
1 үлгі		
2 үлгі		
3 үлгі		
4 үлгі		
5 үлгі		

Үлгілерді микроқұрылымдық зерттеуге дайындау

Басып шығарудан кейін үлгілер субстраттан кесіліп алынып, гриндер құрылғысы арқылы беттері тегістелді. Тегістелген үлгілер Buehler маркалы құрылғыда әртүрлі түйіршіктік өлшемдері бар абразивті қағаздармен (180, 320, 600, 1200 grit) ажарланды (3а-сурет). Абразивті қағаздар материалдың беткі қабатын тиімді түрде алып тастау үшін қолданылды. Кейіннен үлгілер MetaDi™ Supreme маркалы алмаз суспензиялары (1F өм, 3F өм және 9 өм) мен жұмсақ жылтырату дискілерінің көмегімен жылтыратылып, айнадай тегіс күйге жеткізілді. Жылтыратылған үлгілер 5 % тұз қышқылы (HCl) ерітіндісімен 4 минут бойы бетін өңдеу (травление) процесінен өткізілді.



а)

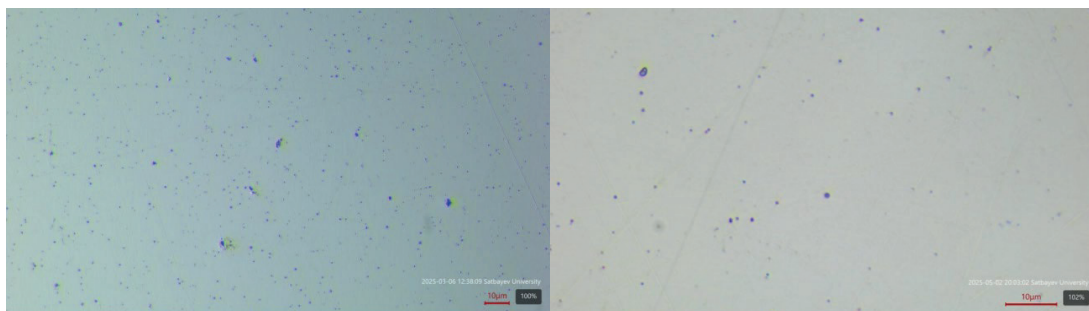
б)

3-сурет – а) Buehler маркалы құрылғысымен ажарландыру процесі.
б) Оптикалық микроскоппен микроқұрылымдық талдау жасау процесі

Ажарлау процесінен кейін алынған үлгілерге микроқұрылымдық сипаттама оптикалық микроскопия арқылы орындалды (3б-сурет). Оптикалық микроскоп 50 мкм-ден 1000 мкм-ге дейінгі аралықта үлкейту мүмкіндігі бар. Фазалық құрамды сандық талдау үшін ImageJ бағдарламасы арқылы өңделді. Микроструктуралық талдау нәтижесінде феррит, перлит, цементит, аустенит және мартенсит фазаларының салыстырмалы аудандары пайыздық үлеспен анықталды.

Нәтижелер және талқылау

Кеуектілік барлық бөлікте кездейсоқ алынған микроструктуралық талдау нәтижесі суреттерінен анықталды. Кеуектілік аймағының пайызын және ең үлкен кеуек өлшемін азайтудың ең жақсы шарттары Ag қорғаныс газын пайдаланғанда кеуектілік төмен болды (4а,б-сурет).



а)

б)

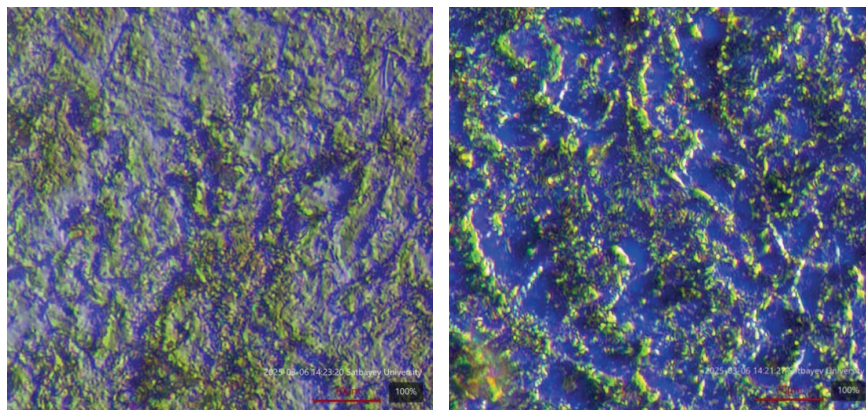
4-сурет – Кеуектілік аймағын салыстыру (үлкейту мөлшері 100х)

а) CO_2 қорғаушы газымен алынған үлгінің микроструктурасы,

б) Ar қорғаушы газымен алынған үлгінің микроструктурасы.

Микроскопиялық зерттеу нәтижесінде CO_2 қорғаушы газымен алынған үлгілерден феррит, перлит және аз мөлшерде цементит фазалары анықталды (5а-сурет). Феррит (α) – ашық түсті, жұмсақ фаза. Перлит ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) – көк-күлгін аймақтарда көрінеді және аустенит қалдықтары күлгін аймақтарда шоғырланды. Цементит (Fe_3C) – қара түсті, қатты компонент ретінде анықталды.

Ar қорғаушы газымен алынған үлгілерде феррит, перлит және аз мөлшерде аустенит және мартенситтік трансформация байқалады (5б-сурет). Феррит (α) көгілдір күлгін түсті, құрылымда ең көп таралған фаза. Перлит ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) – жасыл сары және қою түсті аймақтарда, көбіне салқындау кезінде пайда болатын фаза. Аустенит және мартенсит – жарық шағылыстары жоғары бөліктер. Аргон газы инертті болғандықтан оттегімен реакция жүрмейді де, беткі оксидтену аз. Бұл құрылым WAAM технологиясы кезінде материалдың термиялық цикліне сәйкес қалыптасқан.

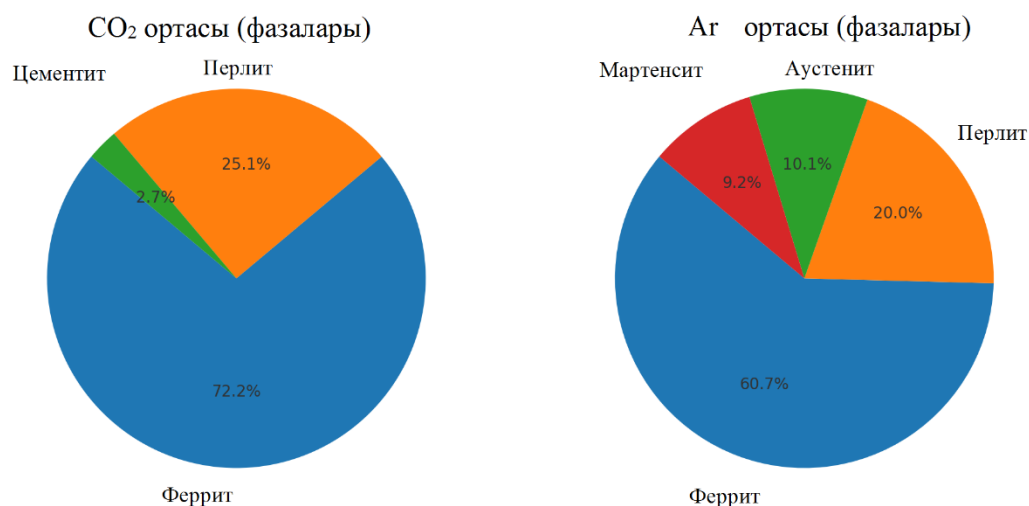
а) CO_2 қорғаушы газымен

б) Ar қорғаушы газымен

5-сурет – Қорғаушы газдармен алынған үлгілердің фазалық ажырату нәтижесі

Fe-C фазалық диаграммасына сәйкес, ER70S-6 болаты 727°C-та эвтектоидтық фазалық түрленуді бастан кешіреді. WAAM процесі кезінде сым аустенит фазасына өтеді де, салқындату барысында феррит перлит құрылымына айналады [11]. Жоғары жылдамдықты салқындату жағдайында мартенситтің пайда болуы мүмкін, алайда бұл зерттеуде негізінен ферритті-перлитті құрылым басым болды.

MIG/MAG әдісі арқылы баспаланғаннан кейін алынған үлгілер микроскоп арқылы зерттелгенде, феррит дәндері мен олардың арасындағы перлит арақашықтары анық көрінеді. Бұл құрылымдар материалдың беріктігі мен тұтқырлығын қамтамасыз етеді. Аустенит фазасының қалдықтары сирек кездеседі және негізінен жылдам салқындау жағдайында ғана байқалуы мүмкін. Цементит пен ферриттің эвтектоидтық комбинациясы ретінде қалыптасуы мүмкін, алайда бұл үлгіде перлит пен цементит көлемі аз, себебі жылдам салқындау мен CO₂ ортасының тотығу қабілеті перлиттің толық дамуына кедергі келтіреді (6-сурет). Аргонның инертті табиғаты ферриттің біркелкі түзілуіне ықпал еткен. Кейбір ірі, шет жақтары ашық түсті, ортасы қою қара дақтар оксидтік қосылыстар болуы мүмкін. Бұл аргонмен баспалау кезінде де беткі тотығу процесінің толық болмауын білдіреді, дегенмен CO₂-мен салыстырғанда олар әлдеқайда аз.



6-сурет – CO₂ және Ar қорғаушы газ орталарында алынған үлгілердің фазалық құрамының сандық үлестірімі

Бұл мәліметтер Ar газында алынған үлгілерде аустенит пен мартенситтің қосымша түзілуі байқалатынын және құрылымының күрделірек екенін 4-кестеде көрсетті.

4-кесте – Фазалық құрамды сандық талдау.

Газ ортасы	Феррит (%)	Перлит (%)	Цементит (%)	Аустенит (%)	Мартенсит (%)
CO ₂	72,2	25,1	2,7	-	-
Ar	60,7	20,0	-	10,1	9,2

Көрсетілген сандық мәліметтерде қорғаушы газдың түріне байланысты фазалық құрамның өзгеретінін айқын көрсетеді, аргон газы кеуектілікті төмендетіп, қосымша аустенит пен мартенсит түзілуіне ықпал етеді.

Қорытындылай келе, WAAM әдістері, материал құрамы, процесс параметрлері, қорғайтын газ құрамы, кейінгі термиялық өңдеулер және микроқұрылымы мен ақаулары WAAM болаттарының механикалық қасиеттерін жақсырақ бақылау үшін жоғарыда аталған факторлар арасындағы корреляцияны әрі қарай түсіну және оларды нақты бақылау, келесі жұмыстарда тереңірек зерттеледі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми мақала №AP19679253 «Көпфункционалды мобильді металл 3д принтерді зерттеу және жобалау» ғылыми жобасы аясында жарияланды (зерттеуді Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады).

Қорытынды

Бұл зерттеу барысында WAAM технологиясын пайдалану арқылы ER70S-6 төмен көміртекті болат үлгілернің микроқұрылымдық қасиеттері белсенді (CO₂) және инертті (Ar) қорғаушы газдар қолданылған жағдайда салыстырмалы түрде зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қорғаушы газдың түрі дайындаған материал құрылымына айтарлықтай әсер етеді.

CO₂ қолданылған үлгілерде феррит, перлит және цементит фазалары айқындалса, Ar қолданылған үлгілерде феррит, перлит, аустенит және мартенситтік құрылымдар анықталды. Сонымен қатар, аргон газы алынған үлгілерде құрылымының біркелкілігі жоғары болып, кеуектілік деңгейі төмен болды. Бұл өз кезегінде материалдың беріктігі мен тұтқырлығын арттыруға ықпал етеді, болашақта механикалық қасиеттерге сынақ жүргізу жоспарлануда. Авторлар аддитивті өндірісте құрылым қасиет арақатынасының маңыздылығын мойындайды және болашақ зерттеулерде аталған сынақтарды жүргізу жоспарлануда. Үлгілердің морфологиялық ерекшеліктері, салқындату жылдамдығы және қабат аралық уақыттың әсері де егжей-тегжейлі сипатталды.

Қорыта келгенде, алынған нәтижелер WAAM технологиясындағы қорғаушы газ түрі баспаланатын өнім сапасына тікелей ықпал ететінін айғақтады. Бұл зерттеу нәтижелерін дәнекерлеу параметрлерін оңтайландыру, құрылымның біртектілігін қамтамасыз ету үшін пайдалануға болады.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M., Benavides, P. Wire Arc Additive Manufacturing for Widespread Architectural Application: A Review Informed by Large-Scale Prototypes // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 906. – <https://doi.org/10.3390/buildings15060906>.
- 2 Scheck, M., Richter, A., Beitler, S., Gehling, T., Treutler, K., Wesling, V., Christian, R., Bohn, C. High geometric fidelity through closed-loop control of the weld pool size in gas metal arc welding based direct energy deposition // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 80. – P. 103944. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103944>.
- 3 Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Iturrioz, A., & Alvarez, P. Strategies to reduce porosity in Al-Mg WAAM parts and their impact on mechanical properties // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 3. – P. 524. – <https://doi.org/10.3390/met11030524>.
- 4 Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M. Challenges and Developments in Wire Arc Additive Manufacturing of Steel: A Review // Results in Engineering. – 2025. – P. 104657. – <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104657>.
- 5 Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A. Methodology for Shielding-Gas Selection in Wire Arc Additive Manufacturing with Stainless Steel // Materials. – 2024. – Vol. 17. – №. 13. – P. 3328. – <https://doi.org/10.3390/ma17133328>.
- 6 Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., Nasiri, A. Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part // Jom. – 2019. – Vol. 71. – P. 4215-4224. – <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5>.
- 7 Zhai, W., Aishwarya, Shandro, R., Zhou, W. Microstructure and mechanical properties of the wire arc additively manufactured 316L/ER70S-6 bimetal structure // Virtual and Physical Prototyping. – 2024. – Vol. 19. – № 1. – P. e2375105. – <https://orcid.org/0000-0002-8769-1152>.
- 8 Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544>.
- 9 Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., Aghion, E. The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition // Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 98. – <https://doi.org/10.3390/met10010098>.
- 10 Vander Voort, G. F. Metallographic Methods, Generally Applicable to All Metals. In: Metals Handbook, 2nd Edition, ASM International Handbook Committee, 1998. – P. 1356–1371. – <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003244>.
- 11 Zou, X., Niu, B., Pan, L., Yi, J. Wire+ arc additive manufacturing and heat treatment of super martensitic stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties // Materials. – 2022. – Vol. 15. – №. 7. – P. 2624. – <https://doi.org/10.3390/ma15072624>.

REFERENCES

- 1 Raspall, F., Araya, S., Pazols, M., Valenzuela, E., Castillo, M., Benavides, P. Wire Arc Additive Manufacturing for Widespread Architectural Application: A Review Informed by Large-Scale Prototypes // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 6. – P. 906. – <https://doi.org/10.3390/buildings15060906>.
- 2 Scheck, M., Richter, A., Beitler, S., Gehling, T., Treutler, K., Wesling, V., Christian, R., Bohn, C. High geometric fidelity through closed-loop control of the weld pool size in gas metal arc welding based direct energy deposition // Additive Manufacturing. – 2024. – Vol. 80. – P. 103944. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103944>.
- 3 Arana, M., Ukar, E., Rodriguez, I., Iturrioz, A., & Alvarez, P. Strategies to reduce porosity in Al-Mg WAAM parts and their impact on mechanical properties // Metals. – 2021. – Vol. 11. – № 3. – P. 524. – <https://doi.org/10.3390/met11030524>.
- 4 Dekis, M., Tawfik, M., Egiza, M., Dewidar, M. Challenges and Developments in Wire Arc Additive Manufacturing of Steel: A Review // Results in Engineering. – 2025. – P. 104657. – <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104657>.
- 5 Teixeira, F. R., Jorge, V. L., Scotti, F. M., Siewert, E., & Scotti, A. Methodology for Shielding-Gas Selection in Wire Arc Additive Manufacturing with Stainless Steel // Materials. – 2024. – Vol. 17. – № 13. – P. 3328. – <https://doi.org/10.3390/ma17133328>.
- 6 Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieezad, M., Nasiri, A. Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part // Jom. – 2019. – Vol. 71. – P. 4215-4224. – <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5>.
- 7 Zhai, W., Aishwarya, Shandro, R., Zhou, W. Microstructure and mechanical properties of the wire arc additively manufactured 316L/ER70S-6 bimetal structure // Virtual and Physical Prototyping. – 2024. – Vol. 19. – № 1. – P. e2375105. – <https://orcid.org/0000-0002-8769-1152>.
- 8 Huang, C., Kyvelou, P., Zhang, R., Britton, T. B., Gardner, L. Mechanical testing and microstructural analysis of wire arc additively manufactured steels // Materials & Design. – 2022. – Vol. 216. – P. 110544. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110544>.
- 9 Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., Aghion, E. The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition // Metals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 98. – <https://doi.org/10.3390/met10010098>.
- 10 Vander Voort, G. F. Metallographic Methods, Generally Applicable to All Metals. In: Metals Handbook, 2nd Edition, ASM International Handbook Committee, 1998. – P. 1356–1371. – <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.a0003244>.
- 11 Zou, X., Niu, B., Pan, L., Yi, J. Wire+ arc additive manufacturing and heat treatment of super martensitic stainless steel with a refined microstructure and excellent mechanical properties // materials. – 2022. – Vol. 15. – № 7. – P. 2624. – <https://doi.org/10.3390/ma15072624>.

01.06.25 ж. баспаға түсті.

15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

26.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***Э. С. Чукенова¹, Е. З. Нугман², А. К. Мустафа³, Ф. Хошнау⁴, И. М. Дюсебаев⁵**

^{1,2,3} Университет имени Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴ Университет Де Монфорта, Великобритания, г. Лестер;

⁵ ТОО «Алматинский завод Электрощит», Республика Казахстан, г. Алматы;

^{2,3} ТОО «RnD Center», Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 01.06.25.

Поступило с исправлениями 15.07.25.

Принято в печать 26.08.25.

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ И ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

В данной статье всесторонне исследовано влияние активного (CO_2) и инертного (Ar) защитных газов, используемых в технологии проволоочной дуговой аддитивной наплавки (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), на микроструктуру образцов, полученных из сварочной проволоки ER70S-6 низкоуглеродистой стали. В ходе экспериментального исследования были оптимально применены одинаковые технологические параметры, изменялся только тип защитного газа. Полученные образцы были предварительно подготовлены и подвергнуты комплексному металлографическому и микроскопическому анализу. В образцах, изготовленных с применением активного защитного газа CO_2 , были выявлены ферритные, перлитные и цементитные фазы, тогда как в образцах с применением инертного газа Ar дополнительно обнаружены аустенитные и мартенситные структуры. Кроме того, было показано, что аргон способствует снижению пористости и улучшению однородности структуры. Это доказывает положительное влияние аргона на устойчивость расплава, процесс кристаллизации и качество зоны термического воздействия во время аддитивного производства. Результаты исследования наглядно продемонстрировали, что выбор защитного газа оказывает прямое влияние на формирование микроструктуры и качество готового изделия в технологии WAAM. Данная работа подчеркивает решающую роль правильного выбора газа в производстве высококачественных, надежных и долговечных металлических конструкций методом аддитивного производства.

Ключевые слова: аддитивное производство, технология WAAM, сталь, защитный газ, микроструктура, поры.

***E. S. Chukenova¹, Y. Z. Nugman², A. K. Mustafa³,
F. Khoshnaw⁴, I. M. Dyussebayev⁵**

^{1,2,3}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴De Montfort University, United Kingdom, Leicester;

⁵LLP «Almaty Electroschit Plant», Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3}LLP «RnD Center», Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 01.06.25.

Received in revised form 15.07.25.

Accepted for publication 26.08.25.

EFFECT OF ACTIVE AND INERT GASES ON THE MICROSTRUCTURE OF STEEL PRODUCED BY WAAM TECHNOLOGY

This article presents a comprehensive study on the effect of active (CO₂) and inert (Ar) shielding gases used in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technology on the microstructure of samples produced from ER70S-6 low-carbon steel welding wire. During the experimental investigation, identical technological parameters were optimally applied, with only the type of shielding gas being varied. The prepared samples underwent thorough metallographic and microscopic analysis. In the specimens produced using the active shielding gas CO₂, ferrite, pearlite, and cementite phases were identified. In contrast, the specimens produced under argon (Ar) revealed additional austenitic and martensitic structures alongside ferrite and pearlite. Furthermore, the use of argon was shown to significantly reduce porosity and contribute to a more uniform microstructure. This indicates the positive effect of argon on melt stability, solidification behavior, and the quality of the heat-affected zone during the additive manufacturing process. The research results clearly demonstrate that the choice of shielding gas has a direct impact on microstructural formation and the quality of the final product in WAAM technology. This study highlights the critical importance of selecting the appropriate shielding gas in the additive manufacturing of high-quality, reliable, and durable metal structures.

Keywords: Additive Manufacturing, WAAM technology, steel, shielding gas, microstructure, porosity.

Теруге 27.08.25 ж. жіберілді. Басуға 30.09.25 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4434

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz