

Study of the influence of electric arc parameters on the structure of parts manufactured using WAAM technology: heat input, wire feed rate

E. Chukenova^{1,2*}

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: elvira_85-11@mail.ru

Abstract. The article analyzes the fundamentals, application features, and key parameters of wire-arc additive manufacturing (WAAM) technology. WAAM technology enables the precise and efficient production of complex metal structures, making it a promising method in modern manufacturing. The primary advantage of WAAM lies in its ability to produce large metal parts at high speed using a layer by layer manufacturing approach. The key parameters of the technology - heat input and wire feed rate - directly impact the quality of the final product. The study examines various welding methods (gas metal arc welding, gas tungsten arc welding, and plasma arc welding), demonstrating how optimizing these parameters can significantly improve the quality of WAAM products. It was also found that the thermal cycles of each layer affect the formation of the microstructure. Controlling the heat input is crucial for effective process management. The challenges of WAAM technology development include the need for part certification, advancements in non-destructive testing methods, and optimization of heat input parameters. Addressing these issues will enhance production efficiency and expand the application scope of WAAM.

Keywords: WAAM technology, welding parameters, heat input, wire feed.

1. Кіріспе

Аддитивті өндіріс соңғы жылдары күрделі пішінді үш өлшемді бөлшектерді жасау мүмкіндігіне байланысты өндірістік парадигманы түбегейлі өзгертті, оларды әдеттегі өндірістік процестер арқылы алу қиын немесе мүмкін емес. Қоспаларды өндірудің әртүрлі әдістерінің ішінде сым доғалы аддитивті өндірісі (WAAM) - металл бөлшектерді қабат-қабатымен жасау технологиясы, ол дәнекерлеу процесін қолдануға негізделген, қол жеткізілген тұндыру жылдамдығының жоғары болуына байланысты үлкен металл бөлшектерді өндіруге мүмкіндік береді. WAAM-ның басты параметрлеріне - жылу кірісі, сым беру жылдамдығы жатады. Дұрыс таңдалған параметрлер материалды артық жұмсаудан сақтап, балқыту процесін тұрақты етеді.

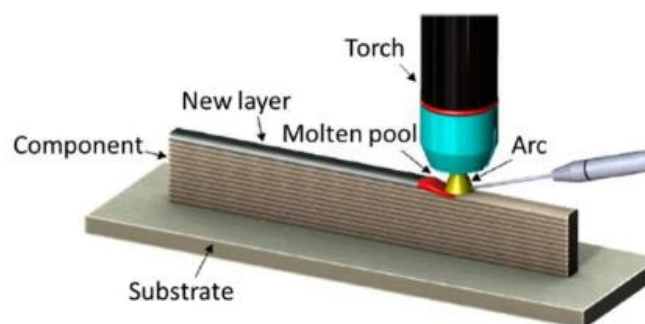
WAAM-ға қызығушылық тұрақты түрде артып келеді, демек, маңызды зерттеу жұмыстары жүргізілуде. Сым доғалы аддитивті өндірісі (WAAM) жылу көзі ретінде электр доғасын және шикізат материалы ретінде қатты сымды пайдаланады [1]. Бұл мақалада WAAM-дағы маңызды параметрлер - жылу кірісі, сым беру жылдамдығы туралы қарастырылды.

2. Зерттеу әдістері мен материалдары

Сым доғалы аддитивті өндіру (WAAM) процесі және түрлері

WAAM технологиясына сәйкес тікелей энергияны тұндыру әртүрлі санаттарға жіктеледі және жылу көзі ретінде пайдаланылатын электр доғасы мен шикізат материалы ретінде пайдаланылатын сымның қосындысы ретінде анықталады. Процесс схемалық түрде 1-суретте

көрсетілген. WAAM автоматтандырылған дәнекерлеу процестерінің іргелі тұжырымдамаларына сүйенеді, мысалы: газды металды доғалық дәнекерлеу (GMAW), плазма доғалық дәнекерлеу (PAW) және газ вольфрамды доғалық дәнекерлеу (GTAW) [2].



Сурет 1. Сым доғалы аддитивті өндіру (WAAM) процесінің схемалық көрінісі [3]

Бұл суретте металл қосылыстарын жасау немесе жөндеу үшін қолданылатын дәнекерлеу немесе аддитивті өндіріс процесін сипаттайды. Суреттегі негізгі элементтерге мыналар жатады:

Torch (дәнекерлеу шамы): Дәнекерлеу процесінде доға тудыратын құрал. Ол металлды балқыту үшін қолданылады.

Arc (электр доғасы): Электр тогы арқылы пайда болатын доға, ол балқытатын жылу шығарады. Бұл доға жұмыс беті мен дәнекерлеу электродтары арасында пайда болады.

Molten pool (балқыма бассейні): Балқытылған металдың аумағы. Бұл бассейн салқындаған соң қатайып, жаңа қабатты қалыптастырады.

New layer (жаңа қабат): Қатты балқыған металдан пайда болған қабат. Бұл әдіс көбінесе аддитивті өндіріс әдісінде қолданылады, мұнда материал қабат-қабат болып қосылады.

Component (компонент): Дәнекерлеу процесінде жасалатын немесе жөнделетін негізгі металл бөлігі.

Substrate (субстрат): дәнекерлеу процесі жүзеге асырылатын негіз.

Газ металды доғалық дәнекерлеу (Gas Metal Arc Welding) — дәнекерлеу үрдісі металл электрод пен дайындама арасында пайда болатын доға арқылы жүзеге асады және дәнекерлеу аймағы инертті газ көмегімен сыртқы орта әсерінен қорғалатын дәнекерлеудің түрі. Ол әдетте субстратқа перпендикуляр болатын тұтынылатын металл сымды тасымалдауға арналған автоматты беру жүйесін қамтиды. Ол жоғары балку тиімділігі мен тұндыру жылдамдығына ие және болат, мыс, алюминий, тот баспайтын болат сияқты барлық коммерциялық маңызды металдарды дәнекерлеуге жарамды.

Газ вольфрамды доғалық дәнекерлеу (Gas Tungsten Arc Welding) — вольфрам электроды мен дайындама арасындағы доғаны пайдаланып жоғары сапалы дәнекерлеуді жасайды. Бұл процесс аргон немесе гелий сияқты инертті газдардың көмегімен қорғалады. GTAW жоғары сапалы дәнекерлеуді қажет ететін салаларда кеңінен қолданылады, себебі ол жоғары дәлдік пен таза дәнекерлеуді қамтамасыз етеді.

Плазма доғалық дәнекерлеу (Plasma Arc Welding) — бұл плазма - доғалық дәнекерлеу процесі, бұл әдісте доға саптама арқылы өтеді де, көбірек бағытталады, ол доғаның тұрақтылығын жақсартады, жылу беру тиімділігін арттырады.

Суық металды тасымалдау (Cold Metal Transfer) — дәнекерлеу робот көмегімен орындалатын дәнекерлеу әдісі болып табылады. CMT қысқа тұйықталуды анықтайды, ол дәнекерлеу толтырғыш материалды тартатын сигнал жібереді, бұл дәнекерлеуге әрбір тамшыны енгізгенге дейін салқындатуға уақыт береді. Бұл әдіс жылудың енгізілуін төмендетіп, дәнекерлеу сапасын жақсарту үшін жасалған.

GMAW доғалық дәнекерлеу WAAM жүйесінде ең көп қолданылатын процесс болып табылады, қолданыстағы процестер кезінде металл инертті газы (MIG)/(MAG) металл белсенді газ қорғаныс ретінде де белгілі. GMAW - балқыту негізіндегі доғалық дәнекерлеу процесі, онда доға тұтынылатын сымның ұшы мен дайындама арасында инертті немесе белсенді қорғаныс газының қорғанысы астында орнатылады, ол сонымен қатар дәнекерлеу пулын және оған жақын материалды қорғайды. Жинақталған материалға және технологиялық параметрлерге байланысты аддитивті өндірісте GMAW пайдалану арқылы тұндыру жылдамдығы 15-тен 160 г/мин аралығында ауытқиды, бұл оны қысқа уақыт аралығында ауқымды бөлшектерді өндіру үшін өте қолайлы етеді [4].

Басқа екі доғалық дәнекерлеу процесі GTAW және PAW болып табылады. Олардың кейбір ұқсастықтары бар, өйткені екеуі де толтырғыш материалсыз инертті қорғаныс газының астында дайындамамен электр доғасын орнату үшін тұтынылмайтын вольфрамды

электродты пайдаланады. GTAW доғалық дәнекерлеудің алғашқы процестерінің бірі болды, ол ешбір ақаусыз жоғары дәлдіктің арқасында кең таралған, өйткені электр доғасы өте тұрақты [5]. Дегенмен, WAAM үшін ол сыртқы толтырғыш материалды қажет етеді. PAW - энергия тығыздығы жоғары процесс, онда доға доғаны шектейтін катод пен анод арасында орналасқан тесік арқылы өтуге мәжбүр болады, нәтижесінде доға тұрақтылығы артады. Негізінен инертті, плазмогенді доғаны қолдану арқылы өте жоғары температура мен энергиясы бар жоғары локализацияланған иондалған плазма пайда болады. Осылайша, ол лазер ретінде жоғары қуатты сәулелермен алынған энергия тығыздығы төмен, бірақ басқа электр доғалық процестерге қарағанда жоғары тығыздығы жоғары энергия процесі болып саналады.

Көп масштабты және көпфизикалық зерттеулер

Ағымдағы зерттеулер негізінен физикалық механизмді түсінбейтін әртүрлі WAAM жүйелерін эксперименталды сынауға бағытталған. Қалыптау дәлдігі мен өнім сапасы физикалық процесспен тығыз байланысты. Бүкіл WAAM процесін сандық талдау және нақты бақылауға тек эксперименттік түрде қол жеткізу қиын. Физикалық процесті толық түсінуді қамтамасыз ететін және технологияны дамыту мен оңтайландыруды жеңілдететін теориялық және симуляциялық зерттеулерге шұғыл қажеттілік бар. Қазіргі уақытта WAAM-да жылу беруді, сым беру жылдамдығын талдау үшін тек бірнеше модельдеу түрлері әзірленген [6].

Зерттеушілер WAAM-да жылу беру және жылуды сақтау мәселелеріне ерекше назар аударуы керек, олар периодты жылдам тепе-теңдіксіз жоғары температурада металлургия, балку және қатаю, метал тамшыларының пайда болуы, балқыған бассейнмен құлау және соқтығысуы, балқытылған металл ағыны және т.б. Шөгінген қабаттардың эволюциясын және термиялық кернеу сипаттамаларын анықтау үшін WAAM-да физикалық құбылыстарды нақты анықтау өте маңызды. Микроқұрылымның эволюциясы мен макроқұрылымның қалыптасуын ескере отырып, WAAM процесі бойынша көп масштабты және мультифизикалық зерттеулер жүргізу қажет.

WAAM-дағы бірқатар физикалық процестер, соның ішінде доғадан сымға жылу беру, сымның балкуы, тамшылардың пайда болуы, субстратпен соқтығысуы және құлауы, қатаю және т.б. Әрбір процесс өнімнің соңғы өлшемдік дәлдігі мен өнімділігіне айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Көптеген параметрлер процестердің функцияларын анықтайды (1-кесте). Процесс параметрлері бұйымның геометриясына, бетінің морфологиясына немесе механикалық қасиеттеріне қалай әсер ететінін анықтау үшін көптеген тәжірибелер жүргізген.

WAAM процесінде қолданылатын процесс параметрлері

WAAM процесінде қолданылатын процесс параметрлері WAAM процесінің түріне және сым материалына байланысты өзгереді. WAAM процесінде материалды тұндыру компонентті жасау немесе жөндеу үшін жылу көзі ретінде доғаны пайдаланып сымды балқытуға негізделген. Материалды тұндыру кезінде қабаттар арасындағы өтулер арасындағы температура қосымша қабаттар қосылған кезде жылудың пайда

болуына байланысты жоғарылайды. Процесс параметрлері жоғары сапалы бөлікті, яғни тамаша механикалық қасиеттері бар ақаусыз құрылымды өндіру үшін өте маңызды. Бұл процестің параметрлеріне дәнекерлеу тоғы, кернеу, сым беру жылдамдығы, қорғағыш газдың құрамы мен шығыны, жылу кірісі т.б. жатады. Бұл параметрлер WAAM өнімінің қасиеттеріне әртүрлі жолдармен әсер етеді және белгілі бір мақсаттар үшін, яғни жоғары механикалық беріктік, аз беттің кедір-бұдырлығы және т.б. үшін осы параметрлердің сәйкес үйлесімі қажет (2-кесте).

Кесте 1. Әртүрлі WAAM процестердің функциялары

WAAM	Жылу көздері	Атқару функциялары
GMAW-ға негізделген	GMAW	Төмен доғаның тұрақтылығы, сым электродты, тұндыру жылдамдығы 3–4 кг/сағ, шашырау.
	CMT-GMAW	Төмен жылу шығыны, сым электродты, тұндыру жылдамдығы: 2–3 кг/сағ, шашырамайды, жоғары технологиялық тұрақтылық.
	Тандем GMAW	Қарапайым жұмыс, екі сымды электродтар, тұндыру жылдамдығы: 6–8 кг/сағ.
GTAW-ға негізделген	GTAW	Бөлек сым беру процесі, сым мен шамды айналдыруды, ерімейтін электродты қажет етеді, тұндыру жылдамдығы: 1–2 кг/сағ.
PAW-ға негізделген	PAW	Нақты сым беру процесі, сым мен шамның айналу бағыты, тұтынылмайтын электродтар, тұндыру жылдамдығы: 2–4 кг/сағ.

Кесте 2. Әртүрлі AM дәнекерлеу процестерінің параметрлері

№	Дәнекерлеуге негізделген	Процес параметрлері
1	GMAW-AM	Ток, доғалық кернеу, сым беру жылдамдығы, тұндыру жылдамдығы, ұшынан қабатқа жанасу бұрышы, саңылау қашықтығы және газ ағынының жылдамдығы.
2	GTAW-AM	Ток, сым беру жылдамдығы, жиілік, газ ағыны, электродтан толтырғыш сымға дейінгі қашықтық, қозғалыс жылдамдығы және газ ағыны
3	PAW-AM	Тұндыру жылдамдығы, сым жылдамдығы, қарқындылық және орташа энергия

GMAW-AM дәнекерлеуінің әсер ететін көрсеткіштері: шөгінді қабаттың беріктігі, бетінің тегістігі, қабаттар арасындағы байланыс сапасы, металлдың микроструктурасы.

GTAW-AM дәнекерлеуінің әсер ететін көрсеткіштері: металлдың тығыздығы, дәнекерлеу сапасы, құрылымның дәлдігі, ішкі кернеулердің минимизациясы, микроқұрылымның біртектілігі.

PAW-AM дәнекерлеуінің әсер ететін көрсеткіштері: энергия тиімділігі, жылулық деформациялардың азаюы, өлшемдердің дәлдігі, қабаттардың қалыңдығының тұрақтылығы, күрделі конструкциялардың сапасы.

Жылу кірісі

Доғалық ток пен кернеу WAAM оңтайландыру процесіндегі басқа маңызды элементтер болып табылады. Олар берілген және дисперсті жылу беру мөлшерін реттейтін, осылайша дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металлының тұнбасына әсер ететін процесті басқарудың негізгі параметрлері болып табылады. Тұрақты емес шөгінділердің және бетінің

нашар кедір-бұдырының алдын алу өте маңызды. Бұған қоса, жылудың шамадан тыс ағыны бұрын тұндырылған қабаттардың қайта балкуына әкелуі мүмкін, бұл дөңдердің микроқұрылымына, өлшемдеріне және оның механикалық сипаттамаларына теріс әсер етеді. Процестің жалпы тиімділігін арттыру үшін ток пен кернеуді оңтайландыру маңызды. Жылу енгізуді дұрыс және тұрақты реттеу WAAM ішінде металды тұндыру үшін қажетті балку жылдамдығына жету үшін өте маңызды [7]. Доға тоғы, кернеу және қозғалыс жылдамдығы WAAM үшін сәйкес жылу профилін анықтайтын негізгі факторлар болып табылады. Жылу көзі (GMAW, GTAW, PAW) беретін WAAM процесіндегі жылу кірісі металды субстрат бетінде тұндыру үшін қажетті жылу мөлшерін білдіреді. Бұл жылуды бөлу қажетті жылу градиентін орнату және балкудан салқындатуға дейінгі шөгіндіні катаюға дейінгі дұрыс жылу циклін қамтамасыз ету үшін қажет. Жылу шығыны әдетте мм-ге Джоульмен өлшенеді және келесі (1) теңдеуінен алынады:

$$Q = \frac{V(U) * I(A)}{TS\left(\frac{mm}{min}\right)} \quad (1)$$

мұндағы Q - жылу кірісі, V - кернеуді, I - токты, ал TS - алаудың жүру жылдамдығы.

$$Q = \mu \frac{V(U) * I(A)}{TS\left(\frac{mm}{min}\right)} \quad (2)$$

WAAM процесіндегі жылу шығынын есептеу (1) теңдеуіне жылу тиімділік коэффициентін (η) қосу арқылы өзгертілді. η мәніне WAAM процесіндегі жылу көзінің орналасуы, тұндыру геометриясының дизайны және (2) теңдеуінде көрсетілгендей қолданылатын материалдың түрі әсер етеді [8]. Бұл WAAM процесінде металдарды балқыту үшін қажетті жылудың оңтайлы мөлшерін алуға мүмкіндік береді. Осылайша, бетінің толқынды морфологиясы, сәйкес келмейтін қабат шөгінділері және өңдеуден кейінгі өңдеуге қажетті уақыт сияқты ақауларды азайтады.

Аралық температураны бақылау және жылуды енгізу стандарттарын сақтау WAAM процесінде жылу шекарасының тұрақтылығын сақтаудың тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Демек, жоларалық оңтайландыру екі қабат арасындағы біріктіру сызығындағы температура градиентін азайтуға тырысады. Сонымен қатар, жылу жинақталуынан туындайтын термиялық бұзылыстың жағымсыз әсерлерін жою үшін жылу енгізуді бақылау маңызды [9]. WAAM процесінде жылуды енгізуді оңтайландыруға әсер еткен көптеген маңызды факторлар бар. Фактордың WAAM өнімінің өнімділігіне әсері, егер ол өте маңызды болса, күшті (S) ретінде белгіленеді. Сонымен қатар, егер ол әлі де әсер ететін болса, бірақ соншалықты маңызды болмаса, ол әлсіз (W) ретінде жіктеледі. Матрицалық кесте негізінде кернеу мен ток арқылы басқарылатын жылу кірісі WAAM өнімінің жалпы өнімділігіне ең маңызды әсер етеді. Сонымен қатар, тиімді қабырға қалыңдығы (EWT) және бетінің толқындылығы (SW) арқылы анықталатын құрылымдық тұтастыққа берілетін оңтайлы жылуға әсер ететін әрбір компонент қатты әсер етеді.

Lervag және авторлар, әртүрлі материал сипаттамалары жылу кірісінің өзгеруі арқылы оңтайландырылған WAAM процесінің орындалуына байланысты болуы мүмкін [10]. Бұл сипаттамаларға созылу деректері, қаттылық мәні (HV), қаттылық, сыну морфологиясы, микроқұрылым сипаттамасы және металаралық қосылыстардың түзілуі жатады. Сонымен қатар, жылу енгізудегі ауытқулар оңтайлы кеуектер құрамының таралуына және тұндыру процесінің сутегі сіңірілуіне сезімталдығына айтарлықтай әсер етеді [11]. Жылу беруді ұлғайту және жылу көздерінің әртүрлі әдістерін пайдалану кеуектер санының жоғары болуына айтарлықтай ықпал етеді [12].

Сонымен қатар, әртүрлі ток (А) мәндерін пайдалану арқылы әрбір тұндырылған алюминий қабаты үшін t % уақыт циклін оңтайландыруға болады, бұл оңтайлы нәтижеге әкеледі, өйткені салқындату механизмдері GTAW жылу кірісімен сызықты түрде жұмыс істейді [13]. Алынған микроқұрылымның фазалары әр қабаттың жылулық циклдерімен елеулі түрде корреляцияланғанын ескере отырып, берілген жылу беру мөлшерін бақылау WAAM процесін оңтайландырудың қосымша әдісі болып табылады [14]. Сонымен қатар, дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің геометриясын процесс параметрлерін бақылауды жақсарту үшін WAAM процесінің жылу көзін модуляциялау арқылы оңтайландыруға болады. Өз зерттеулерінде Greebmalai және авторлар сымын пайдаланған кезде бір дәннің пайда болуы тұрғысынан айтарлықтай артықшылықтарға әкелетінін анықтады [15]. Қосымша өндіріс (AM) жүйесінде тұндыру тиімділігін арттыру үшін айналмалы токты пайдалану арқылы жылу енгізуді оңтайландыруға болады [16].

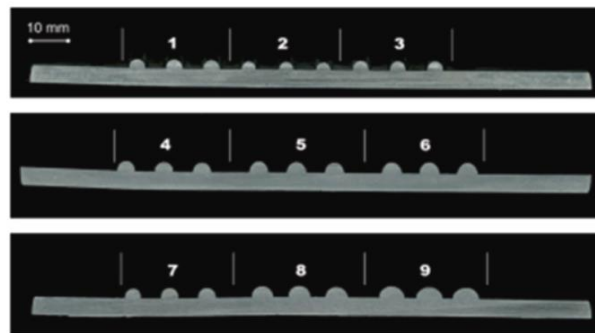
3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Сым беру жылдамдығы

WAAM кездескен негізгі мәселе - дәнекерлеу балқымасының тұндыру жылдамдығын арттыру немесе жылуды бөлуді азайту туралы шешім қабылдау. Себебі сым беру жылдамдығы деп те аталатын сым беру жылдамдығы (WFR) қажетті жылу енгізуімен тығыз байланысты [17]. Демек, шамадан тыс баяулық тұндырылған металдарда жинақталған қалдық кернеуді бұзбау үшін оңтайлы сым беру жылдамдығын таңдау өте маңызды. Керісінше, жылдамдықты қолдану дәндердің әрбір қабатын қалыптастыру кезінде деформацияға әкелуі мүмкін. Тұндыру процесі шамадан тыс жылуды тудырады, бұл бұрын жасалған қабаттардың қайта балқып кетуіне әкеледі және сайып келгенде, микроқұрылым мен дәндер пішінінің нашарлауына әкеледі. Сәйкес WFR таңдау төмен тұндыру жылдамдығы қажет болғанда беттің тегістігінің сапасын арттыруы мүмкін. Сонымен қатар, Baffa және авторлар WFR GMAW көмегімен ER70S-6 болат дәнекерлеу балқымасына пайда болуына айтарлықтай әсер ететінін көрсетті 2-сурет [18]. Түрлі WFR нұсқалары жоғары сапалы дән өлшемдерін береді.

WFR манипуляциясы мен басқаруына таңдалған жылу көзі де әсер етті. CMT техникасын пайдаланатын WAAM әдісі тұндыру бетінің дәйекті құрылымын қамтамасыз ету үшін басқарылатын төмен жылуды енгізуді және төмен WFR пайдаланады. Бұл дәнекерлеу

бассейнінің толып кетуін немесе құлауын тиімді болдырмайды [20]. Депозиттің оңтайлы сапасы мен депозиттік мөлшерлемесін алу үшін WFR де маңызды [21]. Сонымен қатар, маңыздырақ ток беру арқылы WFR мен энергия кірісін арттыру тұндыру жылдамдығын арттырудың тиімді әдісі болып табылады [22]. Дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің морфологиясын оңтайландыруға арналған тұндыру әдісінің өміршеңдігі WFR, дәнекерлеу тогы, қозғалыс жылдамдығы (TS), субстраттың қисаю бұрышы және дәнекерлеу шамының бұрышын ескере отырып анықталды [23].

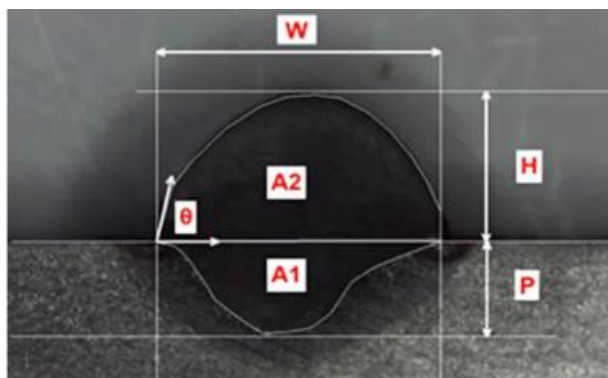


Сурет 2. Тогыз түрлі WFR көмегімен дән өлшемдерін көлденең бақылау [19]

Xiong және авторлар H08Mn2Si болат компоненттерінің көлбеу бұрышы пайдаланылатын WFR мәндеріне кері пропорционал екенін анықтады, бұл GMAW арқылы берілетін жылуды оңтайландыруда WFR манипуляциясының маңыздылығын көрсетеді [24]. Сонымен қатар, UTP 759 Ni–Cr–Mo қорытпасының асып түсу ерекшеліктері, дөңгелек үлгілері және бұрыштық құрылымдары үшін дизайн геометриясының күрделілігінің дәрежесі жылу көзінің түрі, ток, кернеу және WFR сияқты факторлардың комбинациясы арқылы оңтайлы түрде басқарылды [25]. Төменгі WFR мәндері ауырлық күшінің әсерін есепке алу кезінде материалдың әрбір келесі қабатқа барабар адгезиясын қамтамасыз ету үшін тиісті жылуды қамтамасыз ету үшін материалды тік емес тұндыру үшін пайдаланылды. Бұл WAAM шығарған компоненттің идеалды геометриялық сипаттамаларына әсер етуде WFR вариациясының маңыздылығын көрсетті.

Yildiz және авторлар WFS (сым беру жылдамдығы) мен TS (факел жылдамдығы) қатынасының дәнекерлеудің геометриясы мен механикалық қасиеттеріне әсерін зерттеді [19]. Бұл зерттеу WFS/TS қатынасы WAAM процесінде жылу беруді басқарудың ең маңызды параметрі екенін көрсетті. Жылу кірісі сипатталған дәнекерлеу геометриясымен сызықты түрде корреляцияланады, соның ішінде биіктігі, ені, енуі, ену аймағы және талданатын параметрлер ауқымы үшін күшейту аймағы. Жеке дәнекерленген жіктердегі жылу мен қаттылық арасында кері байланыс байқалды. Wang және авторлар дәнекерлеу геометриясына сым беру жылдамдығының және басқа параметрлердің әсерін зерттеді [26]. Бұл зерттеу GTAW негізіндегі WAAM 4043 Al қорытпасында сым беру жылдамдығы артқан сайын дәнекерлеу биіктігі артып, дәнекерлеу ені азаятынын көрсетті. Сондай-ақ, сым беру жылдамдығы артқан

сайын сымды балкытуға қажетті доға энергиясы арта түсетіні хабарланды. Осылайша, бұл біріктірудің болмауына және дән енінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Әдеттегі дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің әртүрлі ерекшеліктері төменде 3-суретте берілген.



Сурет 3. Әртүрлі дәнекерлеу сипаттамаларының схемалық диаграммасы (материал: ER120S-G), авторлық құқық Springer Nature, рұқсатымен шығарылған [26]

Бұл суретте дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің геометриялық параметрлерін сипаттайды. Дәнекерлеу процесінде пайда болған балқыманың (дәнекерлеу аймағының) геометриялық өлшемдері маңызды, себебі олар дәнекерлеудің беріктігі мен сапасын анықтайды. 3-суретте келесідей элементтер көрсетілген:

W – ені, бұл параметр дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің көлденең ені болып табылады. Ол дәнекерлеудің бүйірден бүйірге дейінгі өлшемін білдіреді.

H – биіктігі, дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің ең жоғарғы нүктесінен бастап негіздің ең төменгі нүктесіне дейінгі арақашықтық.

P – ену тереңдігі, негізгі материалға дәнекерлеудің қаншалықты терең енгенін көрсетеді. Бұл параметр дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің беріктігіне айтарлықтай әсер етеді.

A1 және A2 – аудандары, дәнекерлеудің негізгі материалға енетін бөлігі. Бұл аймақ балқыманың негізгі материалмен байланысуын сипаттайды. A2 жоғарғы бөлігі (дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің қалпы). Бұл қосымша балқыманың әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің бетінде орналасқанын көрсетеді.

θ – қисық бұрышы, бұл параметр дәнекерлеу әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің шеттеріндегі бұрыштық пішінді сипаттайды. Бұрыштың шамасы дәнекерлеу әдісіне және әсерінен балқыған сұйық металл көлемінің сапасына байланысты.

Бұл параметрлердің әрқайсысы дәнекерлеудің сапасын, беріктігін және өнімділігін бағалауда маңызды рөл атқарады. Дұрыс геометрия дәнекерлеу қосылысының беріктігін арттырып, оның ұзақ уақыт қызмет етуін қамтамасыз етеді.

4. Қорытынды

Мақалада сым-доғалы аддитивті өндіріс (WAAM) технологиясының негіздері, процестері мен

қолданылатын параметрлерінің ерекшеліктері кеңінен талданған. Зерттеулер көрсеткендей, WAAM технологиясы күрделі металл конструкцияларын тиімді және дәл жасауға мүмкіндік береді, бұл оны заманауи өндіріс саласында болашағы зор әдістердің біріне айналдырады. WAAM технологиясының газ металды доғалық дәнекерлеу (GMAW), газ вольфрамды доғалық дәнекерлеу (GTAW) және плазма доғалық дәнекерлеу (PAW) сияқты түрлі түрлері параметрлік оңтайландырудың нәтижесінде өнім сапасын айтарлықтай жақсарты алады.

Зерттеу WAAM әдістерінің жетілдірілуіне арналған бірнеше маңызды аспектілерді анықтайды, оның ішінде жылу кірісінің, сым беру жылдамдығының және процестік параметрлердің әсері ерекше орын алады. Сонымен қатар, бөлшектерді сертификаттау және бұзбайтын бақылау әдістерін дамыту қажеттілігі де өзекті мәселе ретінде белгіленген. Бұл шаралар WAAM технологиясының қолдану аясын кеңейтіп, өндіріс тиімділігін арттырады. Осылайша, WAAM болашақта қосымша өндіріс саласындағы басты технологиялардың бірі болатыны анық.

References / Әдебиеттер

- [1] Tian, C.L., Chen, J.L., Dong, P., He, J.W. & Wang, Y.J. (2015). Current state and future development of the wire arc additive manufacture technology abroad. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2, 57–60
- [2] Jafari, D., Vaneker, T.H. J. & Gibson, I. (2021). Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202, 109471
- [3] McAndrew, A.R., Rosales, M.A., Colegrove, P.A., Hönnige, J.R., Ho, A., Fayolle, R., ... & Pinter, Z. (2018). Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+ arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Additive Manufacturing*, 21, 340–349
- [4] Ding, D., Pan, Z., Van Duin, S., Li, H. & Shen, C. (2016). Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing. *Materials*, 9(8), 652
- [5] Oliveira, J.P., et al. (2016). Tungsten inert gas (TIG) welding of Ni-rich NiTi plates: Functional behavior. *Smart Materials and Structures*, 25(3), 03LT01
- [6] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., & Oliveira, J.P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121
- [7] Rosli, N.A., Alkahari, M.R., Abdollah, M.F., Maidin, S., Ramli, F.R. & Herawan, S.G. (2021). Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 2127–2145
- [8] Yamaguchi, M., Komata, R., Furumoto, T., Abe, S. & Hosokawa, A. (2022). Influence of metal transfer behavior under Ar and CO₂ shielding gases on geometry and surface roughness of single and multilayer structures in GMAW-based wire arc additive manufacturing of mild steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–16
- [9] Geng, H., et al. (2017). Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manu-

- facturing 5A06 aluminium alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(6), 472–483
- [10] Lervag, M., Sørensen, C., Robertstad, A., Brønstad, B. M., Nyhus, B., Eriksson, M., ... & Bunaziv, I. (2020). Additive manufacturing with superduplex stainless steel wire by CMT process. *Metals*, 10(2), 272
- [11] Derekar, K.S., Addison, A., Joshi, S.S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., ... & Griffiths, D. (2020). Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 311–331
- [12] Fang, X., et al. (2018). Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. *Materials*, 11(11), 2075
- [13] Ayarkwa, K.F., Williams, S.W., & Ding, J. (2017). Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire+ arc additive manufacture. *Additive Manufacturing*, 18, 186–193
- [14] Hosseini, V.A., et al. (2019). Wire-arc additive manufacturing of a duplex stainless steel: Thermal cycle analysis and microstructure characterization. *Welding in the World*, 63, 975–987
- [15] Grebmalai, J., & Warinsiriruk, E. (2020). Multi-heat input technique for aluminum WAAM using DP-GMAW process. *AIP Conference Proceedings*, 2279(1)
- [16] Miao, Y., et al. (2021). Joint characteristics of carbon steel bypass-current PAW on additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 408–416
- [17] Kumar, N., et al. (2022). Wire arc additive manufacturing—a revolutionary method in additive manufacturing. *Materials Chemistry and Physics*, 285, 126144
- [18] Baffa, F., Venturini, G., Campatelli, G., & Galvanetto, E. (2022). Effect of stepover and torch tilting angle on a repair process using WAAM. *Advances in Manufacturing*, 10(4), 541–555
- [19] Yildiz, A.S., Davut, K., Koc, B., & Yilmaz, O. (2020). Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: Study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 3391–3404
- [20] Wang, P., Zhang, H., Zhu, H., Li, Q., & Feng, M. (2021). Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: Processing, microstructure, and mechanical behavior. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116895
- [21] Mok, S.H., Bi, G., Folkes, J. & Pashby, I. (2008). Deposition of Ti–6Al–4V using a high-power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics. *Surface and Coatings Technology*, 202(16), 3933–3939
- [22] Wang, C., Suder, W., Ding, J., & Williams, S. (2021). The effect of wire size on high deposition rate wire and plasma arc additive manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 288, 116842
- [23] Cao, H., Huang, R., Yi, H., Liu, M. & Jia, L. (2022). Asymmetric molten pool morphology in wire-arc directed energy deposition: Evolution mechanism and suppression strategy. *Additive Manufacturing*, 59, 103113
- [24] Xiong, J., Lei, Y., Chen, H., & Zhang, G. (2017). Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 397–403
- [25] Evjemo, L.D., Langelandsvik, G., Moe, S., Danielsen, M.H., & Gravdahl, J.T. (2022). Wire-arc additive manufacturing of structures with overhang: Experimental results depositing material onto fixed substrate. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 186–203
- [26] Wang, H., Jiang, W., Ouyang, J. & Kovacevic, R. (2004). Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1), 93–102

WAAM технологиясымен жасалатын бөлшектердің құрылымына электр доғасының параметрлері: жылу кірісі, сым беру жылдамдығының әсерін зерттеу

Э. Чукунова^{1,2*}

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: elvira_85-11@mail.ru

Андатпа. Мақалада сым-доғалы аддитивті өндіріс (WAAM) технологиясының негіздері, қолдану ерекшеліктері және негізгі параметрлеріне талдау жасалған. WAAM технологиясы күрделі металл конструкцияларды дәл және тиімді жасауға мүмкіндік береді, бұл оны заманауи өндіріс саласында перспективалы әдіс ретінде танытады. WAAM-ның басты артықшылығы – қабат-қабатпен өндіру әдісі арқылы ірі металл бөлшектерді жоғары жылдамдықпен жасау мүмкіндігіне ие. Технологияның негізгі параметрлері – жылу кірісі мен сым беру жылдамдығы, өнімнің сапасына тікелей әсер етеді. Зерттеу барысында әртүрлі дәнекерлеу әдістері (газ металды доғалық, газ вольфрамды доғалық және плазмалық доғалық дәнекерлеу) талданған. Олар параметрлерді оңтайландыру арқылы WAAM өнімдерінің сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, әр қабаттың жылулық циклідері микроқұрылымның

қалыптасуына әсер ететіні анықталған. Бұл процесті тиімді басқару үшін жылу беру мөлшерін бақылау маңызды. WAAM технологиясын дамытудың өзекті мәселелері ретінде бөлшектерді сертификаттау, бұзбайтын бақылау әдістерін жетілдіру қажеттілігі және жылу параметрлерін оңтайландыру қарастырылған. Бұл шаралар өндіріс тиімділігін арттырып, WAAM-ның қолдану аясын кеңейтеді.

Негізгі сөздер: *WAAM технологиясы, дәнекерлеу параметрлері, жылу кірісі, сым беру.*

Исследование влияния параметров электрической дуги на структуру деталей, изготавливаемых с использованием технологии WAAM: тепловой поток, скорости подачи проволоки

Э. Чуkenova^{1,2*}

¹*Satbayev University, Алматы, Казахстан*

²*Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан*

*Автор для корреспонденции: elvira_85-11@mail.ru

Аннотация. В статье проведен анализ основ, особенностей применения и ключевых параметров технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM). Технология WAAM позволяет точно и эффективно изготавливать сложные металлические конструкции, что делает её перспективным методом в современной промышленности. Основное преимущество WAAM заключается в возможности производить крупные металлические детали с высокой скоростью методом послойного построения. Основные параметры технологии, такие как тепловложение и скорость подачи проволоки, оказывают прямое влияние на качество конечного изделия. В ходе исследования были рассмотрены различные методы сварки (газовая дуговая сварка, газовая вольфрамовая дуговая сварка и плазменная дуговая сварка). Оптимизация параметров этих процессов позволяет значительно улучшить качество продукции WAAM. Также установлено, что тепловые циклы каждого слоя влияют на формирование микроструктуры. Для эффективного управления процессом важно контролировать количество тепловложений. К актуальным вопросам развития технологии WAAM отнесены сертификация деталей, совершенствование методов неразрушающего контроля и оптимизация тепловых параметров. Решение этих задач повысит эффективность производства и расширит области применения WAAM.

Ключевые слова: *технология WAAM, параметры сварки, тепловой поток, подача проволоки.*

Received: 07 November 2024

Accepted: 16 March 2025

Available online: 31 March 2025