



ХҒТАР 55.13.99
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-83-95>

Цилиндрлік бөлшекті 3d басып шығару үшін аз инвестициямен WAAM платформасын пайдалану мүмкіндігін зерттеу

Қ.Е Кудиярбек^{1*} , Е.З.Нұғман^{1,2} , А.Қ. Мустафа^{1,2} 
М.Қ. Сағынтай^{1,2} , И.М. Дюсебаев¹ 

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Алматы қ., Қазақстан

²TOO "RnD Center", Алматы, Қазақстан

*E mail: kudiyarbek.k@gmail.com, e.nugman@satbayev.university,
a.mustafa@satbayev.university, skmuchagali-2009@mail.ru, nomad.i.m.13@mail.ru*

Аңдатпа. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - бұл доғалық дәнекерлеу процесіне негізделген металл аддитивті өндіріс технологиясы, ол сымды электродты балқыту арқылы қабаттап металл бөлшектерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Заманауи зерттеудің басым бөлігі роботталған дәнекерлеу жүйесін пайдаланады. Бұл зерттеуде аз инвестициялы және қарапайым конфигурация негізінде құрастырылған WAAM жүйесін қолданып, цилиндрлік бөлшектерді жасаудың мүмкіндігі зерттелді. Құрылғы ретінде айналмалы үстел мен тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен үйлесімі арқылы жүзеге асырылды. Құю процесі GMAW (Gas Metal Arc Welding) әдісімен жасалынды. Сымды электрод ретінде нарықта жиі кездесетін ER70S-6 аз көміртекті болат қолданылды. Және 100% аргон қорғаныш газын пайдалану арқылы жүргізілді. Басылып шыққан цилиндрлік бөлшек кесіліп, ажарлау-жылтыратудан кейін микроскоп арқылы микроқұрылымдық талдау жүргізілді. Микроқұрылымда дәндер ұсақ, изотропты формада таралған, ал қабатаралық шекараларда ақаулар мен тотығу іздері байқалмады. Бұл жылудың біркелкі бөлінгенін және қорғаныш ортаның дұрыс таңдалғанын көрсетті. Алынған нәтижелер қарапайым WAAM жүйесін қолдана отырып, жоғары сапалы металл компоненттерін жасауға болатынын және бұл әдістің шағын өндірістер мен зертханалар үшін қолжетімді шешім бола алатынын дәлелдейді.

Түйін сөздер: WAAM технологиясы, көміртекті болат, дәнекерлеу параметрлері, цилиндрлік бөлшек, микроқұрылым

Түсті 05.06.2025. Жөнделді 10.10.2025. Мақұлданды 16.10.2025. Онлайн қолжетімді 30.12.2025

* хат-хабар үшін автор

Кіріспе

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - сымды балқытып, қабаттап металл бұйымдарын жасауға негізделген аддитивті технология [1]. Бұл әдіс ұнтаққа негізделген Selective Laser Melting (SLM) немесе Electron Beam Melting (EBM) сияқты күрделі технологияларға қарағанда арзанырақ [2,3], өнімділігі жоғары [4]. WAAM доғалы дәнекерлеу технологиясына негізделген және өндірістік масштабтағы бөлшектерді жасауға мүмкіндік береді [5,6].

Алайда WAAM-ға қатысты қазіргі зерттеулердің басым бөлігі күрделі және қымбат роботтандырылған жүйелерді пайдалануға негізделген [3]. Күрделі пішінді бөлшектерді жасау үшін көп ості роботтарсыз, үш ості жүйелермен де жұмыс істеуге болады [7]. Цилиндрлік бөлшекті дайындау үшін тек айналмалы үстел мен екі ось жеткілікті [8]. Мұндай қарапайым конфигурация арқылы өндіріс шығынын едәуір төмендете отырып, қабат сапасы жағынан бәсекеге қабілетті нәтижеге қол жеткізуге болады. Қарапайым конфигурация WAAM технологиясын аз шығынмен шағын және орта өндіріс орындарына, ғылыми зертханаларға және жөндеу учаскелеріне енгізу өзекті әрі маңызды болып табылады [9].

Осындай қарапайым конфигурациялық жүйемен алынған қабаттардың сапасын жан-жақты бағалау үшін микроқұрылымдық зерттеу ерекше маңызға ие [10]. Микроқұрылымдық талдау қабатаралық байланыстың сапасын, дәннің өсу бағытын, кеуектердің түзілуін және басқа да ықтимал ақаулардың бар жоғын көрсетеді [11]. Сондықтан бұл жұмыста қарапайым WAAM конфигурациясымен цилиндрлік үлгілер жасалынып, олардың микроқұрылымы зерттеледі. Бұл өз кезегінде тиімділігі жоғары әрі арзан өндірістік шешімдерді негіздеуге мүмкіндік береді.

Әдіснама

Қабаттарды құю үшін диаметрі 0.8 мм ER70S-6 маркалы дәнекерлеу сымы пайдаланылды. 1- кестеде AWS A5.18 стандарты бойынша сымының химиялық құрамы көрсетілген.

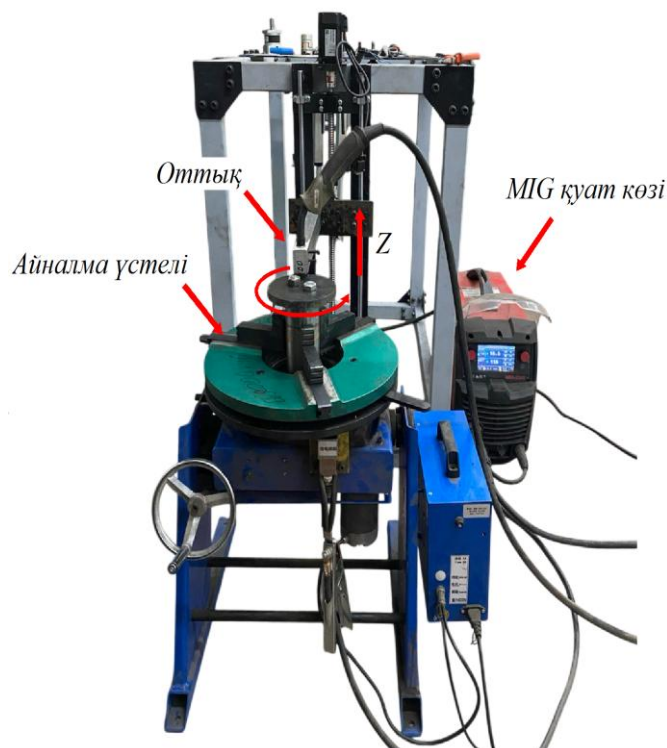
1-кесте. ER70S-6 сымының химиялық құрамы (массалық үлесі, %) [12]

Элемент	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Құрамы	0.06-0.15	1.40-1.85	0.8-1.15	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	Қал.

Бұл зерттеуде қолданылған WAAM жүйесі қарапайым әрі үнемді конфигурацияға негізделді. Жүйе айналмалы үстел және тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен жабдықталған. Жетек ретінде қадамдық қозғалтқыш қолданылды (1 сурет). Айналмалы үстелге субстрат бекітілді, субстрат диаметрі Ø140 мм және қалыңдығы 12 мм болатын аз көміртекті болат дайындама қолданылды. Z-осі бойымен оттық орнатылды. Құю процесі GMAW (Magnetta MIG-220S) аппаратымен жүргізілді. Қорғаныш газ ретінде 100% аргон қолданылды. Аргон инертті газ болғандықтан, ол доға аймағында тотығуды азайтып, балқу тұрақтылығын арттырады және кеуек санын азайтады [13]. Әсіресе аз көміртекті

болаттарды басу кезінде бұл маңызды[14].

Негізгі дәнекерлеу параметрлері 2-кестеде көрсетілген. Қабат пен шүмек арақашықтығы 7 мм-ге тең болды. Құйылған цилиндрлік қабырға 10 қабаттан тұрды. Қабат қалыңдығы 5 мм, биіктігі 3 мм, құйылған цилиндр диаметрі Ø115 мм, цилиндр биіктігі 30 мм (2-сурет).



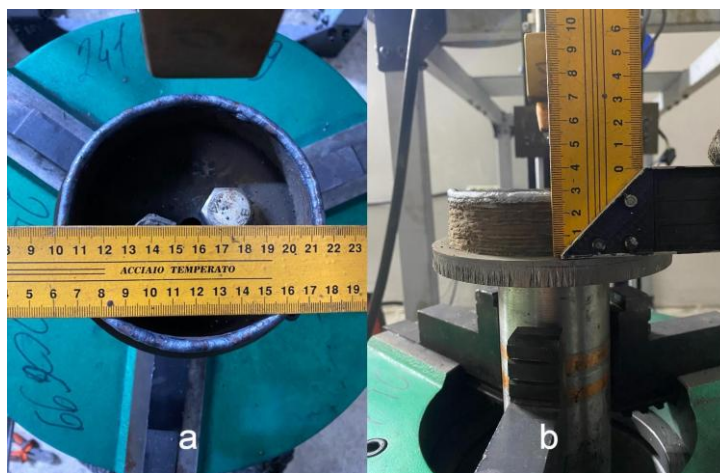
1-сурет. Өндіру үшін пайдаланылған GMAW-WAAM платформасы

Үлгі бөлме температурасында ауада суытылды.

2-кесте. Дәнекерлеу параметрлері (GMAW-MIG процесі)

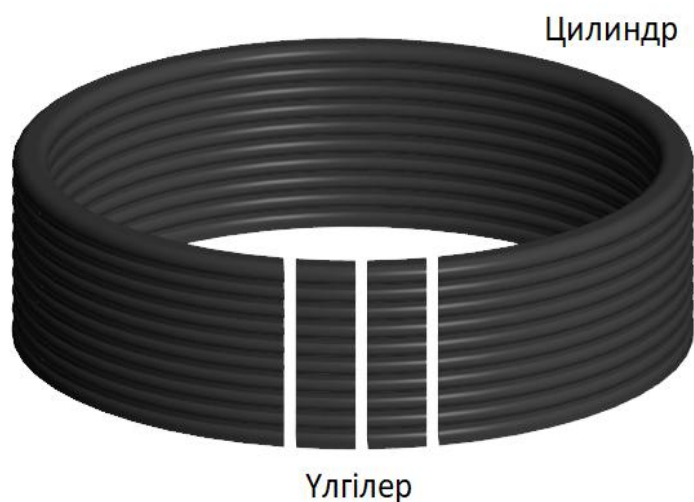
Параметр	Мәні	Бірлігі
Доғалық ток	119	А
Доғалық кернеу	18.3	В
Сымды беру жылдамдығы	6.7	м/мин
Қабат құю жылдамдығы	360	мм/мин
Субстраттың айналу жылдамдығы	1	айн/мин

Микроструктуралық зерттеу жүргізу үшін үлгі цилиндрлік қабырғадан тік бағытта сектор түрінде кесіліп алынды (3-сурет). Зерттеу үлгісі цилиндрдің төменгі бөлігінен жоғарғы жағына дейінгі қабаттарды қамтыды, бұл термиялық әсер мен құрылымдық өзгерістердің биіктік бойынша таралуын бақылауға мүмкіндік берді. Микроструктуралық зерттеу WAAM әдісімен дайындалған цилиндрлік бөлшектерден алынған металлографиялық шлифтерде жүргізілді.



2-сурет. Басып шыққан цилиндрлік компонент: а) үстінен қарағандағы көрініс б) алдынан қарағандағы көрініс

Үлгілер алдымен механикалық әдіспен тік қимада кесіліп, кейін Buehler EcoMet автоматтандырылған ажарлау-жылтырату жүйесінде стандартты металлографиялық дайындық протоколына сәйкес өңделді (ASTM E3-11)[15]. Алдымен әртүрлі gritті SiC қағаздарымен, P320–1200 бірізділікпен ажарланып, кейін алмаз пасталары көмегімен $9\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 3\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ }\mu\text{m}$ -ге жылтыратылды. Жылтыратылған беттер HCl ерітіндісінде химиялық өңдеуден өтті, бұл феррит-перлит фазаларын, қабатаралық шекараларды айқын көруге мүмкіндік берді.



3-сурет. Зерттеуге дайын үлгі

Зерттеу Leica DMi8 инверттелген оптикалық микроскопында 50–1000× үлкейту ауқымында жүргізілді. Құрылымды жалпы сипаттау үшін әр қабат аймағынан көлденең және тік бағытта шлифтер алынды. 50× үлкейту – макроақауларды анықтау үшін, 100×–200× үлкейту – дән бағыты мен шекараларын бағалау үшін, 500×–1000× үлкейту – перлит пен ферриттің морфологиясын және микро фазалық қатынасты анықтау үшін қолданылды. Анализ барысында дән түзілу бағыты, қабаттар арасындағы шекаралар, фазалық құрылым (феррит-перлит), ықтимал ақаулар зерттелді.

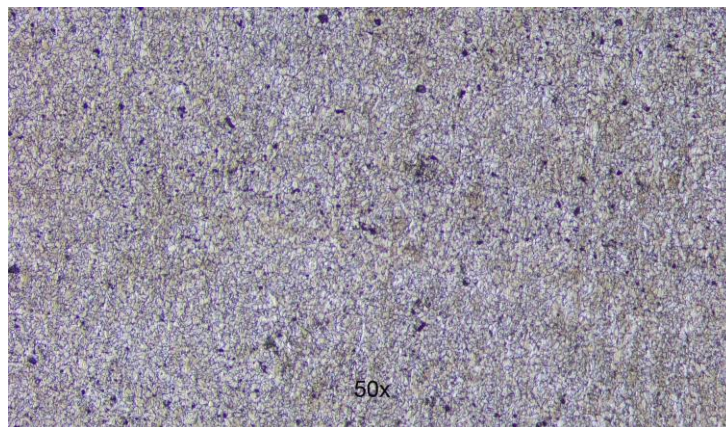
Нәтижелер мен талқылау

50× үлкейту (4-сурет) кезінде зерттелген үлгіде макроақаулар мен толық балқымау аймақтары байқалмады. Бұл қабатаралық металлургиялық байланыстың толық және сапалы жүзеге асқанын дәлелдейді. Қабаттардың арасындағы шекаралар визуалды түрде ажыратылғанымен, құрылым үздіксіз және біртекті болғаны байқалды.

100×–200× үлкейту (5-сурет) ауқымында жүргізілген бақылау барысында дәндердің шекаралары нақты көрінді. Дәндер бір-бірімен тығыз орналасқан, ұсақ әрі көпбұрышты пішінге ие. Дән түзілу бағыты негізінен изотропты, яғни қабат биіктігі бойынша бағытталмаған, бұл жылу енгізудің бірқалыпты және айналмалы WAAM конфигурациясымен жақсы басқарылғанын көрсетеді.

500×–1000× үлкейту (6-сурет) деңгейінде феррит пен перлиттің фазалық құрылымы айқындалды. Феррит матрицасында ұсақ перлит аралшалары шашыранды түрде таралған. Перлиттің мөлшері аз, бірақ жеткілікті түрде байқалады. Екі фазаның арасындағы шекаралар анық және контрастылы. Фазалар арасында үздіксіз өту байқалмайды, яғни кристалдану мен салқындау режимі жақсы бақыланған.

Жалпы алғанда, алынған құрылым біркелкі, тығыз және ақаусыз, дәндер арасындағы шекаралар айқын, ал феррит-перлит фазалық арақатынасы төмен көміртекті болатқа тән тепе-тең құрылымды көрсетеді. Бұл WAAM процесінің тұрақты орындалғанын және өңделген аймақтарда құрылымдық бұзылыстардың болмағанын растайды.

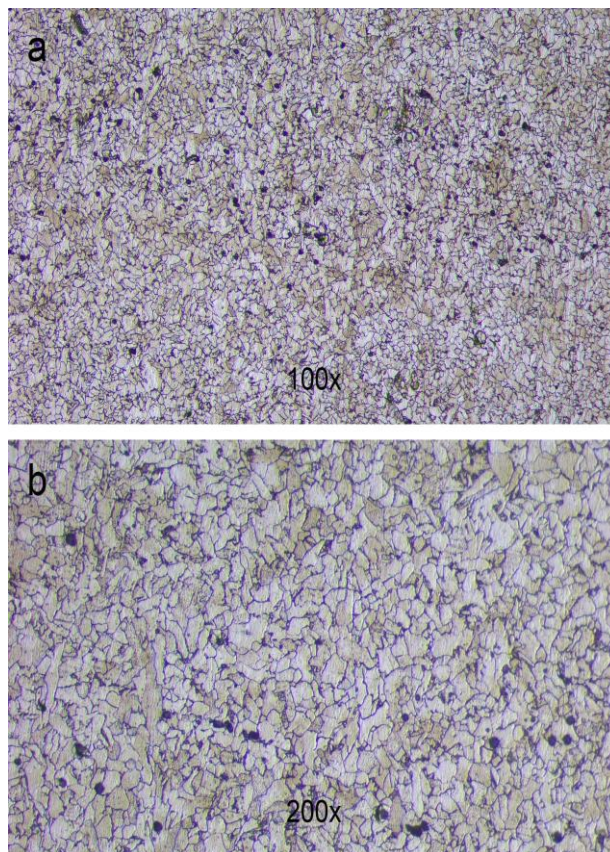


4-сурет. Микроқұрылым: 50× үлкейту

Bellamkonda және әріптестерінің (2021) [16] зерттеуінде WAAM арқылы алынған көміртекті болат компоненттерінде қабаттар арасындағы бағытталған дән өсуі байқалып, төменгі қабаттарда жылу жинақталуынан дәндердің өсуі тіркелген болатын. Ал біздің

жағдайда әр қабат аймағында дәндер ұсақ әрі изотропты пішінде таралған, бұл айналмалы үстел конфигурациясының термиялық жүктемені тең бөлуді қамтамасыз еткенін көрсетеді.

Сонымен қатар, Т. Роп және т.б. (2019) [4] зерттеулерінде WAAM әдісімен алынған төмен көміртекті болат құрылымында тотығу және кірме фазалардың болу ықтималдығы көрсетілген. Ал біз қолданған 100% аргон атмосферасы бұл факторларды тиімді түрде басып, шөгу мен тотығу өнімдерінің пайда болуын болдырмады. Бұл біздің жағдайдағы қорғаныш газдың тиімді таңдалғанын дәлелдейді

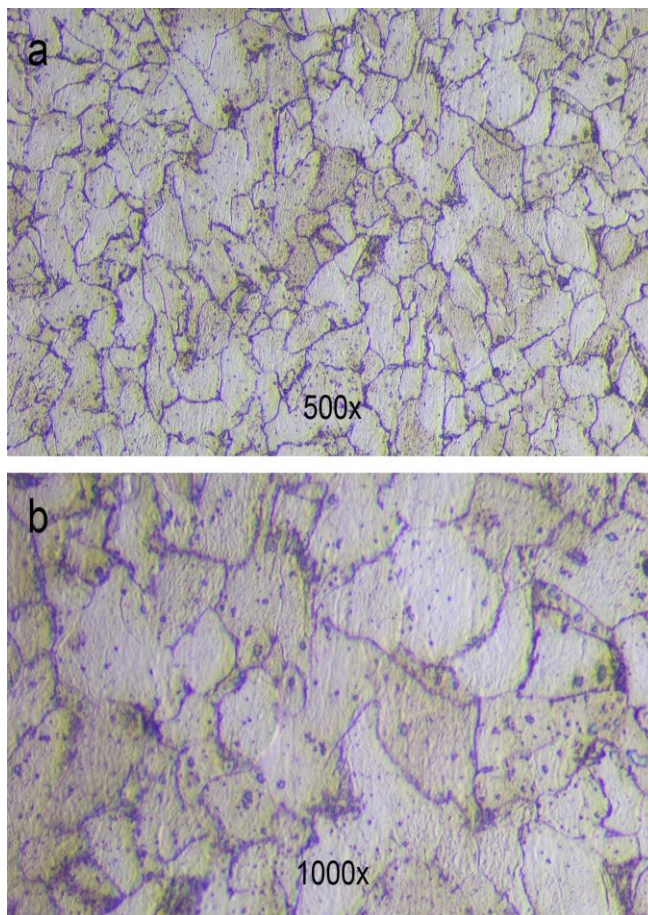


5-сурет.Микроқұрылым: а)100х үлкейту б)200х үлкейту

Алынған нәтижелер өнеркәсіптік роботтар мен жоғары класты қуатты дәнекерлеу көздерімен [4,16] жүргізілген зерттеулермен бәсекелесе алатын деңгейде болды. Жалпы, алынған микроструктуралық нәтижелер басқа зерттеулермен салыстырғанда жоғары сапалы және біркелкі құрылымның қалыптасқанын дәлелдейді. Бұрынғы әдебиеттерде келтірілген кейбір WAAM жұмыстарында қабатаралық ақаулар мен дәндердің өсуі жылу жинақталуына және біркелкі емес энергия енгізуге байланысты байқалса[17,18], бұл жұмыста мұндай құбылыстар тіркелген жоқ. Бұл өз кезегінде қолданылған конфигурацияның тиімділігін көрсетеді.

Жалпы, бұл зерттеу ресурстары шектеулі ортада – шағын өндіріс орындарында, зерттеу институттарында және білім беру мекемелерінде қолдануға болатын модульдік WAAM жүйелерін дамытудың өзектілігін көрсетеді. Жоғары инвестиция мен инженерлік

күрделілікке байланысты бұған дейін қолжетімсіз болған WAAM технологиясын кеңінен енгізуге жол ашады.



6-сурет. Микроқұрылым: а) 500× үлкейту б) 1000× үлкейту

Қорытынды

Осы уақытқа дейінгі WAAM зерттеулердің басым бөлігі күрделі және көп инвестиция қажет ететін қымбат роботтар қолданылды. Бұл зерттеуде аз инвестициямен, қарапайым WAAM конфигурациясын қолданып, 3d цилиндрлік бөлшектерді басу тиімділігі зерттелді. Осындай қарапайым конфигурациялық мүмкіндігін бағалау үшін микроқұрылымдық зерттеу маңызды. Айнаlmалы үстел мен тік бағыттағы Z-ось қозғалыс модулімен үйлесімі арқылы сапалы цилиндрлік бөлшек алынды. Сынаманы микроқұрылымын зерттеуде: 50× үлкейтуде құрылымы үздіксіз және біркелкі екені байқалды және макроақаулар, толық балқымау аймақтары байқалмады, бұл металлургиялық байланыстың сапасын көрсетті. 100×–200× үлкейтуде дәндердің ұсақ, көпбұрышты әрі изотропты таралғаны анықталды, бұл жылу біркелкі бөлінгенін және қорғаныш газдың тиімді таңдалғанын көрсетті. Ал 500×–1000× үлкейтуде феррит матрицасындағы перлит аралшалары анық көрініп, фазалық құрылымның контрастылы әрі тұрақты екені байқалды. Нәтижесінде металл бөлшектерді аддитивті әдіспен аз шығынмен жасауға болатынын және таңдалған

конфигурацияның тиімділігі дәлелденді. Бұл WAAM технологиясын шағын өндіріс орындарында, оқу және зерттеу мекемелерінде қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бұл жұмыс алдағы зерттеулерге негіз болады. WAAM технологиясын қолжетімді етіп, оны өндірістік кәсіпорындарға енгізуге жол ашады.

Алғыс айту, мүдделер қақтығысы

ЖТН АР23487120 «Әскери мақсатта қолданылатын цилиндр тәріздес бөлшектерді жасау технологиясын әзірлеу»

Авторлардың қосқан үлесі

Кудиярбек Қ.Е. – мақала тақырыбын ұсынды, зерттеу концепциясын әзірледі, эксперимент жүргізді және мақаланың алғашқы нұсқасын жазды.

Нұғман Е.З. – әдеби шолу жүргізіп, нәтижелерді талдауға қатысты, мақаланың құрылымын жетілдірді.

Мустафа А.Қ. – қолданылған әдістерді таңдады және әдістемелік бөлімді жазуға атсалысты.

Сағынтай М.Қ. – зерттеу нәтижелерін интерпретациялады және техникалық суреттер мен кестелерді дайындады.

Дюсебаев И.М. – мақаланың ғылыми редакциясын жүргізді және соңғы нұсқасын бекітуге қатысты.

Әдебиеттер тізімі

1. Alaboudi S.F. The innovation in wire arc additive manufacturing (WAAM): A review // Materials Research Proceedings. – 2023. – Vol. 31. – P. 522. – DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902592-54>. - ағылшын тіліндегі журнал
2. Navarro M., Matar A., Diltemiz S.F., Eshraghi M. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 6, № 1. – P. 3. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>. - ағылшын тіліндегі журнал
3. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – Vol. 65. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7. - конференция материалдары
4. Ron T., Levy G.K., Dolev O. et al. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 888. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met9080888>. - ағылшын тіліндегі журнал
5. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 13. – Article 100330. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>. - ағылшын тіліндегі журнал
6. Shah A.A., Aliyev R., Zeidler H., Krinke S. A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 97. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>. - ағылшын тіліндегі журнал
7. Nagamatsu H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative

- system for wire and arc additive manufacturing and machining // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 31. – Article 100896. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>. - ағылшын тіліндегі журнал
8. Lockett H., Ding J., Williams S., Martina F. Design for wire + arc additive manufacture: design rules and build orientation selection // Journal of Engineering Design. – 2017. – Vol. 28. – P. 568. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>. - ағылшын тіліндегі журнал
9. Khan A.U., Madhukar Y.K. An economic design and development of the wire arc additive manufacturing setup // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 91. – P. 182. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.166>. - ағылшын тіліндегі журнал
10. Kumar N., Bhavsar H., Mahesh P.V.S. et al. Wire arc additive manufacturing – a revolutionary method in additive manufacturing // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 285. – Article 126144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144>. - ағылшын тіліндегі журнал
11. Wang J., Zhu K., Zhang W. et al. Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356 component // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 22. – P. 982. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.116>. - ағылшын тіліндегі журнал
12. ER70S-6 Carbon Steel Welding Wire // Technical Specification Sheet. – The Harris Products Group, A Lincoln Electric Company. – Mason, OH, USA, 2008. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.harrisproductsgroup.com/en/>. - техникалық сипаттама
13. Rao Z., Liao S., Tsai H.-L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>. - ағылшын тіліндегі журнал
14. Purwaningrum Y., Triyono T., Pu M., Alfariz F. Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding (GMAW) of low carbon steel (LR Grade A) // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 705. – P. 250. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.705.250>. - ағылшын тіліндегі журнал
15. ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. – ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.astm.org/e0003-11.html>. - стандарт
16. Bellamkonda P.N., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2021. – Vol. 30. – P. 188. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0019>. - ағылшын тіліндегі журнал
17. Cunningham C., Flynn J.M., Shokrani A. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 22. – P. 672. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>. - ағылшын тіліндегі журнал
18. Tonelli L., Sola R., Laghi V. et al. Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100175>. - ағылшын тіліндегі журнал

Қ.Е. Кудиярбек*¹, Е.З. Нұғман^{1,2}, А.Қ. Мустафа^{1,2}, М.Қ. Сағынтай^{1,2}, И.М. Дюсебаев¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²ТОО "RnD Center", г.Алматы, Казахстан

Изучение возможности использования платформы WAAM для 3D-печати цилиндрической детали с минимальными инвестициями

Аннотация. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) - это технология аддитивного производства металлов, основанная на процессе дуговой сварки, которая позволяет формировать металлические детали слоями путем плавления проволоочного электрода. В подавляющем большинстве современных исследований используется роботизированная система сварки. В этом исследовании была изучена возможность изготовления цилиндрических деталей с использованием системы WAAM, построенной на основе низкоинвестиционной и простой конфигурации. В качестве устройства реализовано сочетание поворотного стола и вертикального Z-осевого модуля движения. Процесс литья производился методом GMAW (Gas Metal Arc Welding). В качестве проводного электрода использовалась распространенная низкоуглеродистая сталь ER70S-6. И 100% аргон проводился с использованием защитного газа. Вырезана цилиндрическая деталь, после шлифовки-полировки проведен микроструктурный анализ под микроскопом. В микроструктуре зерна распределены в мелкой изотропной форме, а на межслойных границах не наблюдалось дефектов и следов окисления. Это показало равномерное распределение тепла и правильный выбор защитной среды. Полученные результаты доказывают, что с помощью простой системы WAAM можно создавать высококачественные металлические компоненты и что этот метод может быть доступным решением для небольших производств и лабораторий.

Ключевые слова: Технология WAAM, углеродистая сталь, параметры сварки, цилиндрическая деталь, микроструктура

K.E.Kudiyarbek^{1*}, Y.Z.Nugman^{1,2}, A.K.Mustafa^{1,2}, M.K.Sagyntay^{1,2}, I.M.Dyussebayev¹

¹Satbayev university, Almaty city, Kazakhstan

²LLP «RnD Center», Almaty, Republic of Kazakhstan

Exploring the possibility of using the WAAM platform for 3D printing of cylindrical parts with minimal investment

Abstract. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) is an additive manufacturing technology for metals based on the arc welding process, which allows metal parts to be formed in layers by melting a wire electrode. The vast majority of modern studies use a robotic welding system. This study investigated the possibility of manufacturing cylindrical parts using a WAAM system based on a low-investment and simple configuration. The device implemented a combination of a rotary table and a vertical Z-axis motion module. The casting process was performed using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) method. Common low-carbon steel ER70S-6 was used as the wire electrode, and 100% argon was used as the shielding gas. A cylindrical part was cut out, and after

grinding and polishing, a microstructural analysis was performed under a microscope. In the microstructure, the grains are distributed in a fine isotropic form, and no defects or traces of oxidation were observed at the interlayer boundaries. This showed uniform heat distribution and the correct choice of protective environment. The results obtained prove that high-quality metal components can be created using a simple WAAM system and that this method can be an affordable solution for small-scale production and laboratories.

Keywords: WAAM technology, carbon steel, welding parameters, cylindrical part, microstructure

References

1. Alaboudi S.F. The innovation in wire arc additive manufacturing (WAAM): A review // Materials Research Proceedings. – 2023. – Vol. 31. – P. 522. – DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644902592-54>.
2. Navarro M., Matar A., Dilemiz S.F., Eshraghi M. Development of a low-cost wire arc additive manufacturing system // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 6, № 1. – P. 3. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010003>.
3. Knezović N., Topić A. Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2018. – Vol. 65. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_7.
4. Ron T., Levy G.K., Dolev O. et al. Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process // Metals. – 2019. – Vol. 9. – Article 888. – DOI: <https://doi.org/10.3390/met9080888>.
5. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 13. – Article 100330. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>.
6. Shah A.A., Aliyev R., Zeidler H., Krinke S. A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, № 3. – P. 97. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030097>.
7. Nagamatsu H., Sasahara H., Mitsutake Y., Hamamoto T. Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 31. – Article 100896. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>.
8. Lockett H., Ding J., Williams S., Martina F. Design for wire + arc additive manufacture: design rules and build orientation selection // Journal of Engineering Design. – 2017. – Vol. 28. – P. 568. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09544828.2017.1365826>.
9. Khan A.U., Madhukar Y.K. An economic design and development of the wire arc additive manufacturing setup // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 91. – P. 182. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.166>.
10. Kumar N., Bhavsar H., Mahesh P.V.S. et al. Wire arc additive manufacturing – a revolutionary method in additive manufacturing // Materials Chemistry and Physics. – 2022. – Vol. 285. – Article 126144. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126144>.
11. Wang J., Zhu K., Zhang W. et al. Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356 component // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 22. – P. 982. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.116>.

12. ER70S-6 Carbon Steel Welding Wire // Technical Specification Sheet. – The Harris Products Group, A Lincoln Electric Company. – Mason, OH, USA, 2008. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.harrisproductsgroup.com/en/>. [technical specifications]
13. Rao Z., Liao S., Tsai H.-L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Applied Physics. – 2010. – Vol. 107. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>.
14. Purwaningrum Y., Triyono T., Pu M., Alfariz F. Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding (GMAW) of low carbon steel (LR Grade A) // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 705. – P. 250. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.705.250>.
15. ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. – ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. – [Электрон. ресурс] – URL: <https://www.astm.org/e0003-11.html>. [standard]
16. Bellamkonda P.N., Malarvizhi S., Balasubramanian V. Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. – 2021. – Vol. 30. – P. 188. – DOI: <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0019>.
17. Cunningham C., Flynn J.M., Shokrani A. et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 22. – P. 672. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
18. Tonelli L., Sola R., Laghi V. et al. Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel // Steel Research International. – 2021. – Vol. 92. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100175>.

Авторлар туралы мәлімет:

Кудиярбек Қ.Е., Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының докторанты, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Нұғман Е.З., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының меңгерушісі және қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050013, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Мустафа А.Қ., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050013, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>

Сағынтай М.Қ., PhD докторы, Сәтбаев университеті, «машина жасау» кафедрасының аға оқытушысы, ғылыми қызметкер, ЖШС «RnD Center», Алматы қ., 050067, Қазақстан Республикасы, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Дюсебаев И.М., PhD докторы, "Алматы Электрқалқан зауыты" ЖШС, бас инженер, Алматы қ., 050061, Қазақстан Республикасы, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.

Кудиярбек Қ.Е., докторант кафедрасы «Машиностроение» Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Нугман Е.З., доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050013; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Мустафа А.Қ., доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, 050013; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Сағынтай М.Қ., PhD, старший преподаватель кафедры «Машиностроение», КазНИТУ им. К.И. Сатпаева; научный сотрудник ТОО «RnD Center», г. Алматы, 050067, Республика Казахстан, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Дюсебаев Ильяс Мурзаханович – PhD, главный инженер ТОО «Алматинский завод Электроштит», г. Алматы, 050061, Республика Казахстан, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.

Kudiyarbek K.E, PhD candidate, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kudiyarbek.k@gmail.com.

Nugman Y.Z. ,PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.nugman@satbayev.university.

Mustafa A.K., PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University, Almaty, 050013; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: mustafa_azamat@mail.ru.

Sagyntai M.K., PhD, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Satbayev University; Researcher, RnD Center LLP, Almaty, 050067, Republic of Kazakhstan, e-mail: skmuchagali-2009@mail.ru.

Dyussebayev I.M., PhD, Chief Engineer, PhD, "Almaty Electroschit Plant" LLP, Almaty, 050061, Republic of Kazakhstan, e-mail: nomad.i.m.13@mail.ru.

