

<https://doi.org/10.51301/jemet.2025.i1.01>

Changes in the microstructure and mechanical properties of products manufactured using WAAM technology

A.K. Baibatsha*

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: akosyabaibatsha@mail.ru

Abstract. The article discusses the possibilities of 3D printing and the WAAM method in production processes. 3D printing is a new technology that allows you to create complex structures and geometries from three-dimensional models. The WAAM method creates conditions for the production of metal parts at high speed and at lower cost by depositing metal layers using wire and an electric arc. This technology is widely used in the aerospace, automotive, and energy industries. The article discusses the advantages of the WAAM method and its role in increasing production efficiency. In addition, some difficulties related to residual stresses and deformations are proposed, as well as ways to reduce them. The study shows the need to improve the microstructure and mechanical properties, and to introduce specific quality control methods. For the future of WAAM technology and its effective use, it is important to conduct additional research and experiments. This method takes the production process to a new level.

Keywords: layering, complex structures, deposition, wire and electricity, wire arc, WAAM method, residual stresses.

1. Кіріспе

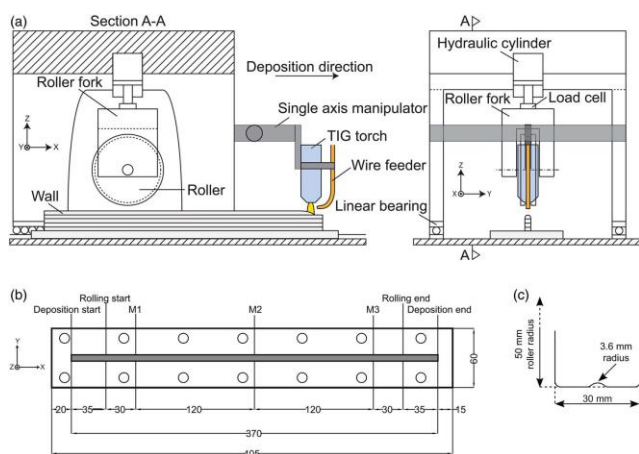
3D басып шығару - бұл үш өлшемді (3D) модельдерінен құрылымдар мен күрделі геометриялардың кең спектрін жасауға арналған аддитивті өндіріс (АӨ) технологиясы. Процесс бір-біріне қабатталатын материалдарды басып шығарудан тұрады. Сонымен қатар әртүрлі әдістерді, материалдар мен жабдықтарды қамтитын 3D басып шығару жылдар бойы даму барысында және өндірістік процестерді түрлендіруге қабілетті болып келеді [1]. Аддитивті өндіріс (АӨ) процестері өңдеу өнеркәсібінде 20 ғасырдың аяғында пайда болды және барған сайын танымал бола бастады. АӨ алғаш рет металл емес материалдарға қолданылып, содан кейін қатарлы қабаттарда күрделі және желілік металл компоненттерін өндіруге бейімделді [2]. Металлға арналған АӨ әдістерінің ішінде қосымша өндіріс сым және доғаға (WAAM) негізделген балқыту, доғаны жылу көзі ретінде пайдалану және оны жоспарланған жол бойымен қабат-қабат құю арқылы қолданылатын сым болып табылады [3]. WAAM доғалық дәнекерлеуді, сымды беруді және роботты қозғалыс жүйелерін біріктіру арқылы жұмыс істейді. [4]. Сым доғасын (WAAM) қолдана отырып, аддитивті өндіріс аэроғарыш, автомобиль, энергетика және басқа да салаларда, сонымен қатар орташа, ауқымды компоненттерді шағын сериялы өндіру үшін энергияны тұндырудың жаңа процесі ретінде даму барысында [5-8]. WAAM металл қабаттарын ашық ортада немесе бақыланатын камерада дәйекті тұндыруға негізделген, бастапқы шикізат ретінде сым шығынын, инертті газбен қорғалған жылу көзі ретінде электр доғасын және компьютерлік жүйенің дәл басқаруындағы манипулятор ретінде роботты қолды немесе портал машинасын

пайдаланады. 3D басып шығару және WAAM сияқты аддитивті өндіріс әдістері күрделі металл компоненттерін құрудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. Бұл технологиялар бөлшектердің тиімді және үнемді өндірісін қамтамасыз ете отырып, әртүрлі салаларда белсенді дамып, қолданылады.

2. Зерттеу әдістері мен материалдары

Нарықта тұндыруға арналған сым материалдарының алуан түрлілігі бар, мысалы болат [9, 10], алюминий қорытпалары [11, 12], титан қорытпалары [13, 14], никель суперқорытпалары [15, 16] және функционалды градуирленген материалдар [17, 18]. WAAM процесі басқа әдістермен салыстырғанда материалдарды аз шығынмен және жоғары өндіріс жылдамдығымен үлкен бөлшектерді шығару қабілетіне байланысты өңдеу өнеркәсібінің назарын өзіне аударады [19, 20]. Осы орайда WAAM технологиясы бойынша жасалған зерттеу жұмыстарына тоқталайық.

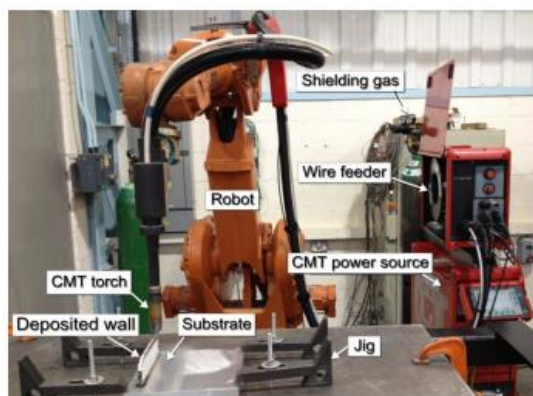
Мақалада тәжірибелер дәстүрлі Lincoln Electric Invertec V310-t AC/DC қуаты және вольфрам инертті газы (TIG) бар илемдеу қондырғысы (1-суретте) арқылы жүзеге асырылады [21]. Зерттеу тәжірибесінде профильді және жалпақ, цементтелетін H13 аспаптық болаттан жасалған. илемдеу жылдамдығы 0.5 м/мин, сонымен қатар электрод пен дайындама арасындағы қашықтық белгілі болды. Бір кіріс арқылы берілетін аргонның тотығуынан қорғау үшін қалқымалы экран пайдаланылды. Экранды жақсарту үшін алюминий тақтайшалар мен арнайы сырғымалы қалқан қолданылды. Қабатты қолдану үшін диаметрі 1.2 мм Ti-6Al-4V дәнекерлеу сымы қолданылды. Роликтердің екі түрі зерттелді:



Сурет 1. Қабаттарды тұндыру және илемдеу үшін эксперименттік қондырғы: а - эксперименттік қондырғының схемасы, б негізгі пластинаның бөліктері, соның ішінде с - қысқа арналған тесіктер және профильді роликтің өлшемдері (а)

Қабатты жағу және илемдеу кезектесіп отырды; жоғарғы қабаттың температурасы пирометрмен бақыланды және илемдеу алдында бөлікті 40°C-тан төмен салқындатуға рұқсат етілді.

Бұл зерттеу жұмысында алюминий қабырғалары WAAM жүйесін қолдана отырып, EN2319 қорытпасының сымынан жасалған [22]. 2219-T851 тақтайшалары субстрат ретінде (2-суретте) пайдаланылды, ал қуат көзі ABB irb2400 роботына қосылған Fronius CMT Advanced 4000 R болды. Кранфилд университетінде құрылған илем қондырғысы қабат аралық илемдеу үшін қолданылды. Қорғаныс газы ретінде 25 Л/мин тұрақты жеткізілімі бар таза аргон пайдаланылды, ал саптамадан жұмыс бетіне дейінгі қашықтық 15 мм болды. Қабырғалардың өлшемдері ұзындығы 500 мм және биіктігі 200 мм болды және олар CMT процесінің барлық төрт нұсқасымен жасалған. Кеуектілік пен микроқұрылымды сынауға арналған үлгілер қабырғаның ортаңғы бөлігінен алынды, өңделді, содан кейін микроқұрылымды анықтау үшін оюланды. Талдау үшін электронды микроскопты сканерлейтін жарық микроскопы және энергия дисперсиясының спектроскопиясы қолданылды. Микроқаттылық 200 г жүктемені 15 секунд ішінде қолдану арқылы анықталды, ал созылу сынақтары 0.1 мин⁻¹ деформация жылдамдығымен BS EN ISO 6892-1:2009 стандартына сәйкес жүргізілді.

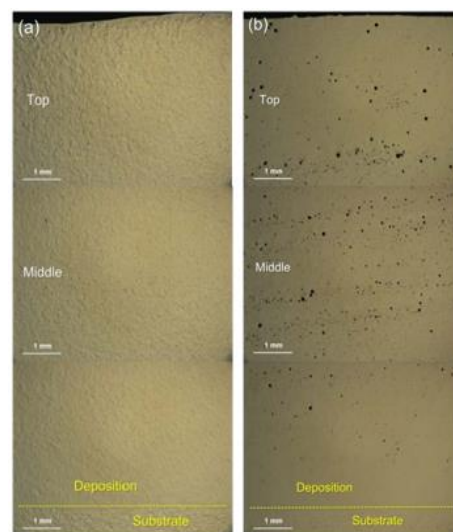


Сурет 2. CMT WAAM эксперименттік жүйесі

Тәжірибе арнайы TIG-аппаратында (Lincoln Electric Invertec V310-T) жүргізілді. Бақылау қабырғасын қосқанда алты қабырға және 50, 75 және 100 кН жүктемесімен профилді роликпен үш үлгі құрылды. Қабаттардың биіктігі илемдеу алдында және кейін үш нүктеде өлшенді, бірінші төрт қабат термиялық әсеріне байланысты есептен шығарылды. Зерттеу жұмысында 4б-суретте көрсетілгендей депозиттік қабаттар арасында айналатын WAAM үлгілерінің микроқұрылымын сипаттау үшін эксперименттер жүргізілді. Негізгі тақтайшалардың ұзындықтары мен қалыңдығы беріліп, бұрандалармен бекітілді.

3. Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Мақалада кеуектілік және микроқұрылым бойынша тәжірибелік жұмысқа тоқталар болсақ [22], (3а-суретте) CMT-PADV процессі импульстік CMT (CMT-P) процесі арқылы салынған қабырғамен салыстырғанда кеуектілікті тиімді түрде жойғаны көрсетілген (3б-суретте онда көптеген ұсақ тесіктер бар (диаметрі 50 мкм-ден аз). CMT процесі немесе басқа дәстүрлі доғалық дәнекерлеу процестері кезінде кіші өлшемде, саусақ тәрізді балқытылған ванна газ тесіктерінің шығуына жол бермейді. Бұған қоса, дендриттердің өсуі мен кеуектердің пайда болу жылдамдығы арасында бәсекелестік бар, сондықтан кеуектіліктің мөлшері дән көлемі тәріздес болып келеді.

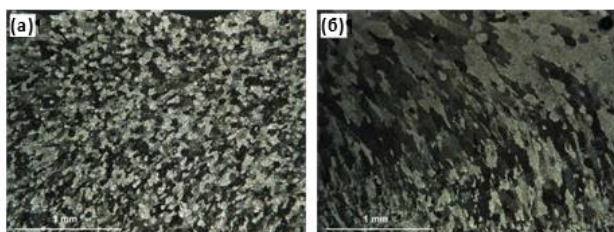


Сурет 3. WAAM 2319 бойлық кеуектілігі (а) CMT-PADV процесі, WFS=6м/мин, TS=0.6 м/мин, HI=112.2 Дж/мм, (б) CMT-р процесі, WFS=6м/ мин, TS=0.8 м/мин, HI=189.1 Дж/мм

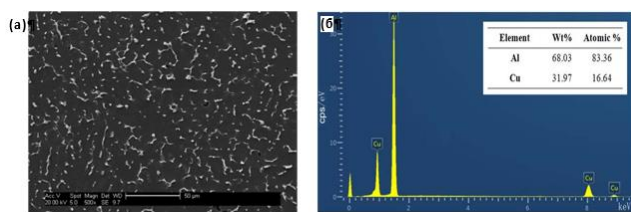
Қатты-сұйық интерфейске (4б-суретте) перпендикуляр және жылу ағынының бағытына сәйкес келетін қатаю кезінде CMT-P процесінің ірі бағаналы дән құрылымдарының өсу бағыты көрсетілген. Жасушалық дендрит, дендриттік қатаю шекарасы және кейбір қосындылар кеуектер үшін гетерогенді нуклеация бөлшектері ретінде пайдаланылуы мүмкін болғандықтан кеуектілік жоғарылайды. Қатаю кезінде қысымның төмендеуіне байланысты ұсақ тесіктер пайда болады.

Дәндердің мөлшері мен морфологиясы негізінен HI деңгейіне байланысты. Төменгі HI түйіршікті құрылымды тиімді жақсарта алады. CMT-PADV

процесінің сұйылтуы төмен және дәндердің жұқа, тең осьтік құрылымы бар екендігін анықтады (4а-суретте). Бұл оның төмен HI-ге байланысты болуы және ол кеуектілікті жою үшін пайдалы. Жетілдірілген CMT процесінде доғаның айнымалы полярлығы да пайдалы, өйткені ол алюминий сымның соңындағы оксидтерді тазартудың айтарлықтай әсерін тигізеді. Бұл жағдайда балқытылған ваннаға түсетін тотығу қабатындағы сутегі мөлшері азаяды.



Сурет 4. (а) CMT-PAY процесі, (б) CMT-P процесі арқылы қолданылатын WAAM 2319 микроқұрылымы



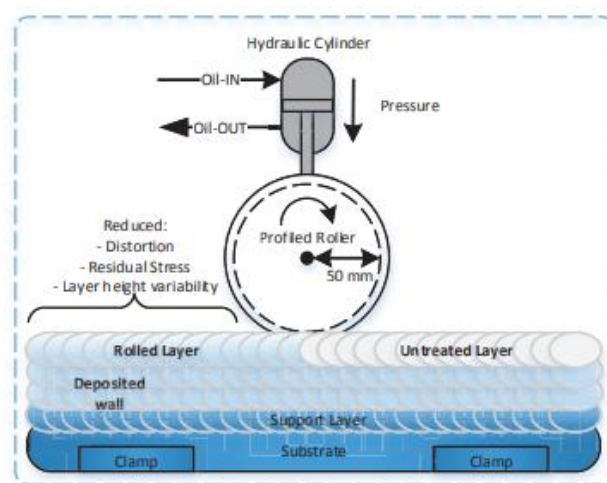
Сурет 5. CMT-PAD (а) процесі арқылы тұндырылған WAAM 2319 микроанализді морфология СЭМ, (б) ақ фазалық ЭҚК талдау

CMT-PAD процесінің (5а-суретте) тұндырылған микроқұрылымы көрсетілген. Ол жұқа дендритті желіден тұрады, олардың арасында бірнеше ақ фазалар бар. Суреттегі ЭҚК талдауы бойынша. (5б-суретте) ақ бөлшектердің құрамында 68.03% Al – 31.97% Cu (мас. %). Al-Cu екілік диаграммасына және алдыңғы зерттеулерге сілтеме жасай отырып, олар α -Al + θ -Al₂Cu эвтектикасы ретінде анықталады, олар дәндер мен субзерендер бойында біркелкі қалыптасқан болатын.

Олар теңгерімсіз салқындату процесінің нәтижесінде дендриттік кристалданудан туындайды. Сым жасау процесінде Ti, Zr элементтерінің көп бөлігі Al₃Ti, Al₃Zr немесе Al₃(Ti, Zr) фазалары түрінде болған. Ерекшеліктері - олардың кейбіреулері алюминий сым матрицасында ериді. Бөлшектердің балку температурасы жоғары және HI процесі төмен болғандықтан, CMT-PAD басқа дәстүрлі доғалық процестерге қарағанда қатайтылған балқытылған ваннада көбірек бөлшектер қалуы мүмкін. Демек, бұл бөлшектер алюминий матрицасымен салыстырғанда ұқсас кристалдық құрылымдары мен тор параметрлеріне байланысты гетерогенді нуклеацияның идеалды бөлшектеріне айналады, сондықтан түйіршіктердің өлшемдері тиімді түрде нақтыланды.

Мақалада жоғары жылу [23] кірісіне байланысты WAAM әдісін қолдану кезінде туындайтын мәселелерді қарастырады. Негізгі мәселелер-механикалық қасиеттер мен деформацияларды нашарлататын қалдық кернеулер, бұл қажетті төзімділікке жетуді қиындатады. Осы мәселелерді шешу үшін үш стратегия тобы ұсынылған

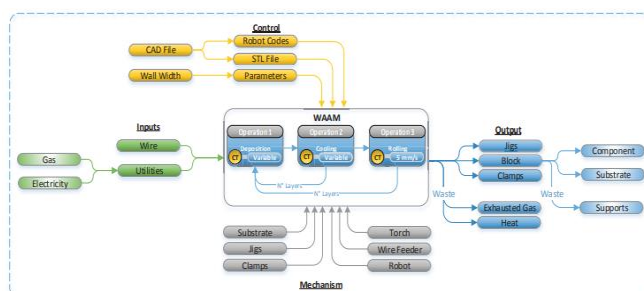
зерттеулер жүргізілді, алдын алу стратегиялары: процесс параметрлерін оңтайландыруды, қысқыштарды пайдалануды және құрылыс әдістерін жақсартуды қамтиды. Олар әсіресе деформацияны азайтуға көмектеседі. Онлайн стратегиялар: материалды беру кезінде ең тиімді, тұрақты. Мысалы, теңдестірілген құрылыс деформацияны азайтуға көмектеседі, ал салқындату уақытын оңтайландыру қалдық кернеуді азайтуға мүмкіндік береді. Кейінгі өңдеу: дәстүрлі термиялық өңдеуді және илемдеуді қамтиды, бірақ шектеулі көлемде илемдеуді тек соңғы кезеңде жүргізуге болады. Ең перспективалы-қалдық кернеуді айтарлықтай төмендететін және материалдың микроқұрылымын жақсартатын процесс – онлайн илемдеу (6-сурет).



Сурет 6. WAAM Online

Сонымен қатар, созылу беріктігі мен сұйықтығы сияқты механикалық қасиеттер жоғарылайды. Халықаралық стандарттарда WAAM үшін сапаны бақылаудың нақты процедурасы жоқ екендігі және процесс параметрлерін таңдау модельдеуге емес, эксперименттік мәліметтерге негізделгені атап өтілді.

WAAM әдісіне арналған WAAM IDEF0 «Integration Definition of Function Modelling» (IDEF0)), (сымды қолдана отырып қосымша өндіріс) моделін қарастырсақ (7-сурет). Бұл модель жүйенің операцияларын, кірістері мен шығыстарын, бақылауларын мен механизмдерін тереңірек түсінуге көмектеседі. Оны құру үшін Кранфилд университетінің дәнекерлеу технологиясы және лазерлік өңдеу орталығының зерттеушісімен сұхбат жүргізілді. IDEF0-дің (7-суретте) негізгі мақсаттары- WAAM туралы жалпы түсінік беру және оқырманға қолдану процесінің логикасын, оның компоненттері мен қажетті ресурстарын түсінуге көмектесу.



Сурет 7. WAAM IDEF0

Мақалада өндірістік жүйені дамыту мақсатында WAAM технологиясын қарастырады. Технология туралы деректерге талдау жүргізілді, оның сипаттамалары анықталды, ақаулар мен оларды төмендету тәсілдері анықталды. WAAM кірістері, шығыстары мен механизмдерін, сондай-ақ қажетті бағдарламалық жасақтама мен аппаратурасы бар жүйенің архитектурасын сипаттайтын IDEF0 моделі ұсынылған. Қолдану процесіндегі негізгі әрекеттер зерттелді және жүйені енгізу үшін маңызды факторлар анықталды. Нәтижелерді талқылау технологияның қолданылуын бағалады және жағымсыз факторларды азайту стратегияларын ұсынылды.

4. Қорытынды

Қорытындылай келе, мақалада талқыланған WAAM өндірісінің технологиясы 3D басып шығару саласында өндірістік процестерді жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндіктер туғызатынын көрсетеді. Бұл әдіс металл бөлшектерін жоғары жылдамдықпен және аз шығынмен жасауға мүмкіндік береді, әрі аэроғарыш, автомобиль және энергетика сияқты түрлі салаларда қолдануға өте тиімді. Нәтижесінде WAAM кейбір қиындықтары, соның ішінде қалдық кернеулер мен деформациялардың мәселелері айқындалды.

WAAM әдісінің тиімділігін арттыру үшін микроқұрылымның сапасын жақсарту, механикалық қасиеттерді нығайту және технологиясының тұрақтылығын қамтамасыз ету маңызды. Содай-ақ, сапаны бақылаудың нақты әдістерін білу қажет, себебі қазіргі таңда бұл салада нақты стандарттар мен әдістер жетіспейді. Осылайша, WAAM технологиясының болашағы зор, бірақ оны тиімді пайдалану үшін зерттеулер мен тәжірибелерді жасап, жақсы нәтижеге қол жеткізуге мақсат қою керек.

References / Әдебиеттер

- [1] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T. & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- [2] Shen, K., Pan, Z., Ma, Y., Cuiuri, D. & Li, H. (2015). Fabrication of high-Fe content Fe–Al intermetallics using wire-arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 7, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.001>
- [3] Guo, X., Li, H., Pan, Z. & Zhou, S. (2022). Microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength Al–Zn–Mg–Cu–Sc aluminum alloy manufactured by wire-arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.009>
- [4] Hönnige, J.R., Colegrove, P.A., Ganguly, S., Eyme, E., Kabra, S. & Williams, S. (2018). Residual stress and distortion control in aluminum wire + arc additive manufacturing with rolling. *Additive Manufacturing*, 18, 775–783. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.015>
- [5] Fronius. (2021). Layer by layer: Economically efficient production of metal components using WAAM. Retrieved from: <http://fronius.com.tw/en/welding-technology/info-centre/magazine/2019/waam>
- [6] Vallourec. (2021). Additive manufacturing solutions for oil & gas market. Retrieved from: <https://solutions.vallourec.com/en/Oil-and-Gas/OCTG/Products/Additive-Manufacturing>

- [7] Fletcher, J.M. (2021). The future for WAAM. AMazing. Retrieved from: <http://additivemanufacturing.com/2019/08/27/the-future-for-waam/>
- [8] Li, Y., Su, C., & Zhu, J. (2022). A comprehensive review on wire arc additive manufacturing: hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future perspectives. *Results in Engineering*, 13, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>
- [9] Colegrove, P.A., Coles, H.E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. & Cozzolino, L.D. (2013). Microstructure and residual stress improvement using high-pressure rolling in wire+arc additive manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 1782–1791. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>
- [10] Rodrigues, T.A., Duarte, V.R., Thomas, D., Avila, H.A., Escobar, J.D., Rossignol, E., Shell, N., Santos, T.G. & Oliveira, J.P. (n.d.). In-situ strengthening of high-strength low-alloy steel using wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Additive Manufacturing*, 34, 101200. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101200>
- [11] Cun, B., Cai, S., Qi, Z., Qi, B., Zhang, Y., Zhang, R., Guo, W., Zhou, Z., Yin, Y. & Bu, S. (2022). Effect of ultrasonic frequency pulsed arc on WAAM-fabricated high-strength aluminum alloys. *Additive Manufacturing*, 51, 102617. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102617>
- [12] Taufik, M.M., Nemat-Alla, M.M. & Dawidar, M.M. (2021). Property enhancement of aluminum alloys fabricated using wire + arc additive manufacturing technology – A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 754–768. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.076>
- [13] Lin, Z., Song, K. & Yu, X. (2021). A review of wire-arc additive manufacturing of titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>
- [14] Xiaolong, K., Zulei, L., Yanhua, G., Zhonggang, S., Yaoqi, W. & Lian, Z. (2022). Grain refinement mechanism of Ti–6Al–4V alloy manufactured by additive manufacturing with hydrogenation process. *Journal of Alloys and Compounds*, 890, 161634. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161634>
- [15] Asala, G., Khan, A. K., Andersson, J. & Ojo, O. A. (2017). Microstructural analysis of ATI 718Plus® fabricated by wire arc additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 4211–4228. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4162-2>
- [16] Kindermann, R.M., Roy, M.J., Morana, R. & Prangnell, P.B. (2020). Inconel 718 response to cold metal transfer wire + arc additive manufacturing. *Materials & Design*, 195, 109031. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109031>
- [17] Shen, K., Pan, Z., Cuiuri, D., Roberts, J. & Li, H. (2016). Fabrication of functionally graded Fe–FeAl using wire arc additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47, 763–772. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0509-5>
- [18] Rodrigues, T.A., Bairrao, N., Farias, F.V.C., Shamsolhodaie, A., Shen, H., Zhou, N., Maawad, E., Schell, N., Santos, T.G. & Oliveira, J. P. (2022). Steel-copper functionally graded material produced by twin-wire arc additive manufacturing (T-WAAM). *Materials & Design*, 213, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110270>
- [19] Fan, S., Chen, G., Yang, J., Xie, Y., Huang, K. & Lu, B. (2021). Wire-arc additive manufacturing of high-strength Al–Zn–Mg aluminum alloy. *Frontiers in Materials*, 8, Article 656429. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.656429>
- [20] Lopez, A., Baselar, R., Pires, I., Santos, T.G., Souza, J.P. & Quintino, L. (2018). Non-destructive testing using radiography and ultrasound for WAAM. *Additive Manufacturing*, 21, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.020>
- [21] Martina, F., Roy, M. J., & Szost, B. A. (2016). Residual stress of as-deposited and rolled wire + arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components. *Materials Science and Technology*, 32(14), 1439–1448. <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1142704>

- [22] Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S.W. & Zhai, Y. (n.d.). Wire + arc additive manufacturing of aluminium
- [23] Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F. & Ding, J. (2015). Designing a WAAM based manufacturing system for de-

fence applications. *Procedia CIRP*, 37, 48-53.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.085>

WAAM технологиясы бойынша жасалған бұйымдардың микроқұрылымы мен механикалық қасиеттерін өзгерту

А.К. Байбатша*

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: akosyabaibatsha@mail.ru

Андатпа. Мақалада 3D басып шығару мен WAAM әдісінің өндірістік процесстердегі мүмкіндіктері қарастырылады. 3D-басып шығару - бұл жаңа технология және күрделі құрылымдар мен геометрияларды үш өлшемді модельдерден жасауға мүмкіндік береді. WAAM әдісі сым мен электр доғасын пайдаланып металл қабаттарын тұндыру арқылы металл бөлшектерін жоғары жылдамдықпен және аз шығынмен өндіруге жағдай жасайды. Бұл технология аэроғарыш, автомобиль, энергетика салаларында кеңінен қолданылады. Мақалада WAAM әдісінің артықшылықтары мен өндіріс тиімділігін арттырудағы рөлі талқыланады. Сонымен қатар, қалдық кернеулер мен деформацияларға байланысты кейбір қиындықтары, сондай-ақ оларды азайту жолдары ұсынылады. Зерттеу микроқұрылым мен механикалық қасиеттерді жақсарту, сапаны бақылаудың нақты әдістерін енгізу қажеттілігін көрсетеді. WAAM технологиясының болашағы және оны тиімді пайдалану үшін, қосымша зерттеулер мен тәжірибелер жүргізу маңызды. Бұл әдіс өндіріс процессін жаңа деңгейге жеткізеді.

Негізгі сөздер: қабаттау, күрделі құрылымдар, тұндыру, сым мен электр, сым доғалы, WAAM әдісі, қалдық кернеулер.

Изменение микроструктуры и механических свойств изделий, изготовленных по технологии WAAM

А.К. Байбатша*

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: akosyabaibatsha@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются возможности 3D-печати и метода WAAM в производственных процессах. 3D-печать-это новая технология, которая позволяет создавать сложные структуры и геометрии из трехмерных моделей. Метод WAAM создает условия для производства металлических деталей на высокой скорости и с меньшими затратами путем осаждения металлических слоев с использованием проволоки и электрической дуги. Эта технология широко используется в аэрокосмической, автомобильной, энергетической отраслях. В статье обсуждаются преимущества метода WAAM и его роль в повышении эффективности производства. Кроме того, предлагаются некоторые трудности, связанные с остаточными напряжениями и деформациями, а также способы их уменьшения. Исследование показывает необходимость улучшения микроструктуры и механических свойств, внедрения конкретных методов контроля качества. Для будущего технологии WAAM и ее эффективного использования важно провести дополнительные исследования и эксперименты. Этот метод выводит производственный процесс на новый уровень.

Ключевые слова: наложение, сложные конструкции, осаждение, проволока и электричество, проволоочная дуга, метод WAAM, остаточные напряжения.

Received: 27 November 2024

Accepted: 16 March 2025

Available online: 31 March 2025