

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

№ 4 (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/JPFT4234>

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

***А. К. Байбатша¹, Е. З. Нұман², А. Қ. Мустафа³, И. М. Дюсебаев⁴**

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

⁴«Алматы Электрқалқан зауыты» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6701-6625>

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

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8514-8300>

*e-mail: akosyabaiatsha@mail.ru

WAAM ТЕХНОЛОГИЯСЫМЕН ДАЙЫНДАЛҒАН ҮЛГІЛЕРДІҢ МИКРОҚҰРЫЛЫМЫНА ҚАБАТАРАЛЫҚ ИЛЕМДЕУДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Қазіргі таңда өнеркәсіпте күрделі пішінді және ірі габаритті металл бөлшектерді тиімді, жылдам әрі үнемді жолмен өндіруге деген сұраныс артып келеді. Бұл қажеттілікті өтеу үшін аддитивті өндіріс технологиялары, оның ішінде доғалы аддитивті өндіріс (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) кеңінен қолданылуда. Алайда WAAM әдісінің басты кемшіліктерінің бірі – қабатаралық шекаралар мен құрылымдағы анизотропия, микрожарықтар және кеуектер сияқты ақаулардың жиі кездесуі. Осыған байланысты, бұл зерттеуде WAAM процесімен біріктірілген MIG дәнекерлеу және әр қабаттан кейін бірден жүргізілетін қабатаралық илемдеу арқылы алынатын құрылым сапасын жақсарту мүмкіндігі зерттелді. Әрбір қабат дәнекерленген соң үлгі бірден пластикалық деформацияға ұшыратылып, дән өлшемін ұсақтау, құрылымның тығыздығы мен біртектілігін арттыру көзделді. ER70S-6 болатынан дайындалған үлгілер Leica DMI8 оптикалық микроскопымен зерттеліп, илемдеудің макро және микродеңгейдегі әсері талданды. Нәтижелер бойынша илемделген үлгілерде қабатаралық шекаралардың жойылып, кеуектілік пен анизотропиялық құрылымның азайғаны, әрі біртекті және ұсақ түйіршікті құрылымның қалыптасқаны анықталды. Бұл илемдеу әдісінің WAAM технологиясында кездесетін құрылымдық кемшіліктерді жоюда және дайын өнім сапасын арттыруда тиімді құрал екенін көрсетті. Алдағы уақытта бұл тәсілді көпбағытты қысым арқылы жетілдіру және деформация әсерін сандық модельдеу арқылы нақтылау ұсынылады.

Кілтті сөздер: аддитивті өндіріс, WAAM технологиясы, MIG дәнекерлеу, қабатаралық илемдеу, құрылымдық талдау, микроқұрылым, пластикалық деформация, ER70S-6 болаты.

Кіріспе

Қазіргі өндірісте күрделі пішінді және үлкен көлемді металл бөлшектерін жылдам әрі үнемді жолмен жасау қажеттілігі артып келеді. Бұл сұранысты қанағаттандыру аддитивті өндіріс технологиялары, әсіресе доғалы аддитивті өндіріс WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) кеңінен қолданыла бастады [1]. WAAM – балқытылған металл сымын қабат-қабатпен қосу арқылы бұйым құрастыруға мүмкіндік беретін, дәнекерлеу процесіне негізделген технология. Оның артықшылығы – өндіріс жылдамдығы жоғары, құрылғы бағасы қолжетімді және ірі габаритті бөлшектер жасауға мүмкіндік береді [2]. Дегенмен, бұл әдіспен алынған бұйымдарда ірі дән құрылымы, бағаналық өсу және анизотропия сияқты мәселелер байқалады [3]. Доға негізіндегі дәнекерлеу кезінде енгізілетін жоғары температура нәтижесінде бөлшекте қалдық кернеулер пайда болады. Бұл кернеулер бұйымды ұстап тұрған қысқыш алынғанда оның формасының бұрмалануына әкелуі мүмкін [4]. Сонымен қатар WAAM технологиясымен алынған бұйымдарда ірі бағаналық дән құрылымы, анизотропиялық қасиеттер және қалдық кернеулер сияқты мәселелер жиі кездеседі. Бұл ақаулар бұйымның механикалық сенімділігі мен өлшемдік дәлдігін төмендетіп, қолдану аясын шектейді. Осы мәселелерді азайту үшін қабатаралық суық илемдеу сияқты пластикалық деформация әдістері қолданыла бастады. Martina және авторлар жүргізген зерттеулерде WAAM әдісімен алынған бөлшектеріне суық илемдеу жүргізу арқылы қалдық кернеудің 60%-ға дейін төмендегені және дән құрылымының майда әрі изотропты пішінге өзгергенін көрсетті [5]. Hönnige және авторлардың зерттеуінде қабатаралық суық илемдеудің дән құрылымын ұсақтап, анизотропияны азайту және текстураны тиімді бақылау арқылы қалдық кернеуді төмендететіні дәлелденді [6]. Сонымен қатар, Gornyaков және басқалары сандық модельдеу арқылы илемдеу параметрлерінің (мысалы, ролик диаметрі мен қысым күші) кернеу-деформация өрістеріне әсерін зерттеп, бұл әдістің тиімді аймақтарын анықтады [7].

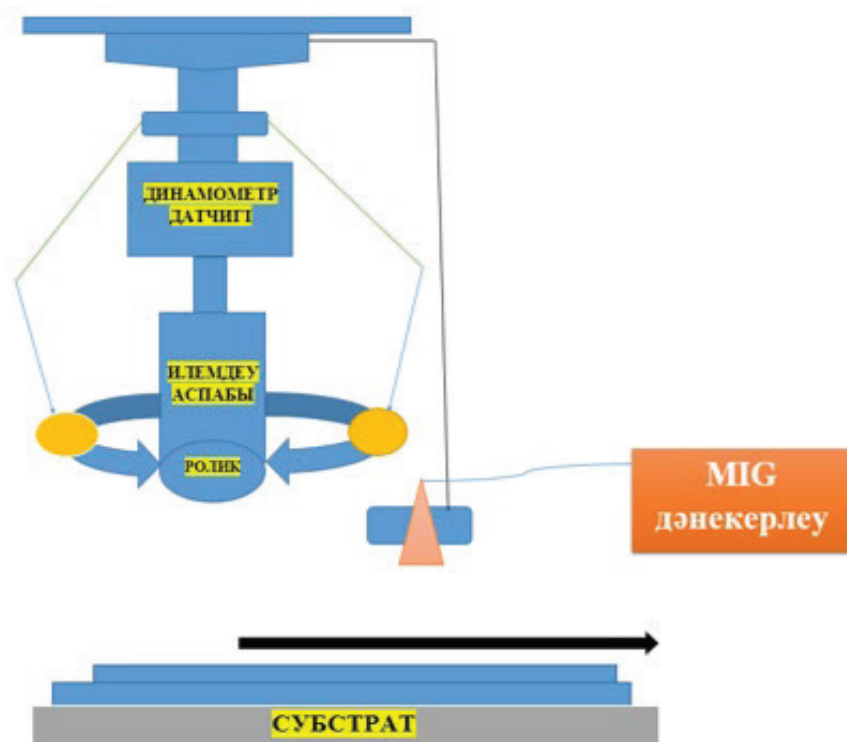
Дегенмен, зерттеулерде кеуектілік, микрожарықтар тәрізді ақаулардың толық жойылмауы немесе механикалық қасиеттердің аймақ бойынша біркелкі бөлінбеуі сияқты мәселелер әлі де шешімін таппай отыр. Сонымен қатар, зерттеу жұмыстарында илемдеу WAAM процесінен кейін бөлшек толық суытылғаннан соң ғана жүзеге асырылған. Осыған байланысты, бұл зерттеу жұмысында бөлшек толық салқындап үлгермей тұрып, WAAM процесінен кейін бірден қабатаралық илемдеуді жүргізу әдісін қолдану ұсынылады. Ол үшін илемделген және илемделмеген үлгілерді салыстыра отырып, дән өлшемі, микроструктура, микрожарықтар сияқты негізгі көрсеткіштер талдау ұсынылады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу жұмысында дәнекерлеу материалы ретінде AWS A5.18 стандартпен жасалған ER70S-6 маркалы көміртекті болат сым қолданылды. Бұл сым көбіне MIG/MAG доғалық дәнекерлеу мен WAAM технологиясы үшін қолданылады, себебі оның жақсы механикалық қасиеттері мен доға тұрақтылығы жоғары. ER70S-6 маркалы сым AWS A5.18 стандартына сәйкес келетін, құрамында

марганец пен кремний мөлшері жоғары көміртекті болаттан жасалған дәнекерлеу материалы болып табылады.

Тәжірибелік жұмысты дайындау әдісі GMAW (Gas Metal Arc Welding) процесіне негізделген MIG дәнекерлеу көзін және онымен біріктірілген илемдеу модулін қамтиды, мұнда дәнекерлеу және пластикалық деформация қатар жүзеге асады. Жұмыс барысында дәнекерлеу материалы ретінде жоғарыда айтылып өткендей ER70S-6 сым қолданылып, балқытылған металл қабаты субстрат (материал болат 3) бетіне құйылады, ал одан кейін бұл қабат бірден илемдеу аспабымен деформацияға ұшырайды. Осылайша, әр қабат WAAM процесі кезінде қалыптасқан бойда илемделіп отырды. WAAM технологиясынан кейін бірден қабатты илемдеу жүргізу үшін дәнекерлеу процесімен біріктірілген арнайы илемдеу жүйесінің схемалық көрінісі (1а және ә-сурет) ұсынылды. MIG дәнекерлеу құрылғысы инертті газбен қорғалатын балқымалы сымды электродты пайдалану арқылы тұрақты доға түзіп, дәнекер тігісін қалыптастырады. Сым автоматты түрде берілді және электр доғасы арқылы балқытылды. Қорғаныс газы ретінде аргон газымен қоспасы балқыманы тотығудан сақтау үшін қолданылды. Бұл әдіс жоғары сапалы және біркелкі дәнекер тігістерін алуға мүмкіндік берді. MIG дәнекерлеу басы тиегі илемдеу ролигінің алдында орналасқан, ал дәнекерлеуден кейін бірден илемдеу процесі іске қосылды. Дәнекерлеу бастиегі мен илемдеу ролигі арасындағы арақашықтық 16 мм құрайды. Илемдеу кезінде қабатқа 50 кН тұрақты күш түсірілді. Бұл күш динамометрлік датчик арқылы бақыланды. Аталған датчик илемдеу құрылғысына интеграцияланған және илемдеу кезінде қабатқа түсірілетін нақты жүктемені нақты уақыт режимінде өлшеп көрсетті. Илемдеу модулінің жоғарғы бөлігінде қысым түсіретін илемдеу ролигі, ал төменгі жағында тірек ролик орналасқан. Жоғарыдан түсірілетін күш субстрат пен балқытылған қабаттың арасында біркелкі пластикалық деформация тудырып, құрылымдық тығыздық пен біртектілікті арттырды. Бұл әдіс әр қабаттың құрылымын қалыптастыру барысында деформациялық әсерді енгізу арқылы бұйымның микроқұрылымын өзгертуге мүмкіндік берді.



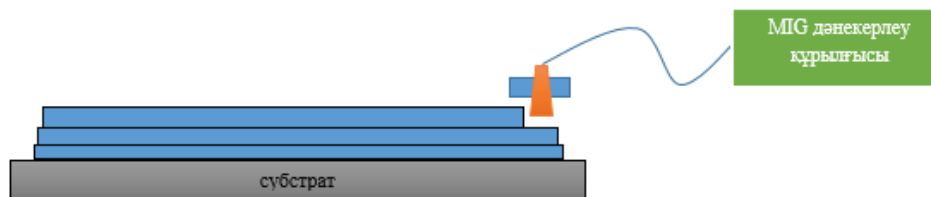
а



ә

1-сурет – Дәнекерлеумен бірге жүргізілетін илемдеу жүйесінің құрылымы және оның тәжірибедегі қолданылуы:
 а – жүйенің жұмыс принципін көрсететін схемалық бейне;
 ә – зертханада қолданылған нақты эксперименттік қондырғының фотосуреті.

Тәжірибе барысында дәнекерлеу процесінің негізгі параметрлері алдын ала оңтайландырылып, олар ER70S-6 сымы үшін жеткілікті жылу енгізу мен қабатаралық тұрақты балқу процесін қамтамасыз етті. Салыстырмалы талдау жүргізу мақсатында илемдеу әдісінде қолданылған барлық параметрлер (MIG дәнекерлеу режимі, ER70S-6 сымы, қабат биіктігі, қорғаныш газы және субстрат түрі) сақтала отырып, илемдеусіз үлгілер де (2-сурет) дайындалды. Бұл үлгілерде WAAM технологиясы арқылы тек дәнекерлеу жүзеге асырылды, ал қабаттарға деформациялық өңдеу қолданылған жоқ.



2-сурет – WAAM технологиясында дәнекерлеу бастиегінің қозғалысы арқылы қабаттық металл құрылымын қалыптастыру процесінің схемалық көрінісі

Тәжірибе барысында дәнекерлеу процесі алдын ала таңдалған технологиялық параметрлерге сәйкес жүргізілді, олардың мәндері төменде 1-кестеде көрсетілген.

1-кесте – WAAM процесі үшін қолданылған дәнекерлеу параметрлері

Параметр	Ұсынылған мәні
Жүру жылдамдығы (Travel Speed, TS)	3,3 мм/с
Сым беру жылдамдығы	3,0 м/мин
Кернеу (Voltage)	24–28 В
Ток (Current)	53 А
Арақашықтық (Torch–Roller)	16 мм
Арақашықтық (Torch–Substrate)	5 мм
Арақашықтық (Roller–Substrate)	3 мм

Осы параметрлер балқымалы қабаттың тұрақты түзілуін және кейінгі илемдеу процесінің тиімді орындалуын қамтамасыз етті, бұл WAAM технологиясында құрылымдық тұтастық пен сапалы қабатаралық байланыс қалыптастыруға мүмкіндік берді.

Үлгіні микроқұрылымды зерттеуге дайындау әдісіне келер болсақ, алынған үлгілер стандартты металлографиялық дайындық әдістемесіне сәйкес тегістеу және ажарлау (жылтырату) процестерінен өткізілді. Тегістеу EcoMet 30 Manual (3-сурет) құрылғысында кремний карбиді негізіндегі абразивті қағаздармен кезең-кезеңімен (P180–P1200) орындалды. Әр кезеңде үлгілер ылғал ортада, белгіленген айналу жылдамдығында (300 айн/мин) өңделіп, беткі ақаулар толық

жойылғанға дейін тегістелді. Жылтырату кезеңінде алмазды суспензиялар (9 μm , 6 μm және 3 μm) және арнайы маталар қолданылып, айналу жылдамдығы 150 айн/мин шамасында ұсталды. Әрбір өңдеу кезеңінде үлгілердің тазалығы қадағаланып, соңғы кезеңнен кейін микроскопиялық талдауға жіберілді.



3-сурет – EcoMet 30 Manual құрылғысы

Микро және макроқұрылымдық талдау Leica DMI8 инверттелген оптикалық микроскоп арқылы жүргізілді (4-сурет). Зерттеуге арналған үлгілер стандартты металлографиялық әдістеме бойынша дайындалып, бастапқыда үлгілер тегістеліп, механикалық өңдеуден өткеннен кейін 3 % Nital ерітіндісімен уландырылды, үлгі сумен шайылды және сүзгі қағазында кептірілді. Инверттелген микроскоптың оптикалық жүйесі ірі үлгілерді зерттеуге қолайлы, ал жоғары ажыратымдылықтағы сандық камера зерттеу нәтижелерін нақты бейнелеуге және тікелей компьютерге жіберуге мүмкіндік берді. Бұл әдіс қабаттық илемдеудің WAAM үлгілеріндегі макроқұрылымға әсерін визуалды түрде бақылауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, осы құрылғы арқылы микроқұрылымдық талдау да жүргізілді. Микроскоптың жарық көзі мен объектив жүйесі дөңдердің морфологиясын, өлшемдерін және олардың бағытталуын анықтауға мүмкіндік берді. Илемделген және илемделмеген үлгілер арасында дән өлшемі мен құрылым біртектілігіндегі айырмашылықтар осы бақылау арқылы тіркелді. Илемдеудің нәтижесінде дөңдердің ұсақталуы, қабатаралық шекаралардың әлсіз көрінісі және құрылым тығыздығының артуы анық байқалды. Бұл өз кезегінде қабатаралық деформацияның материал құрылымына айтарлықтай әсер ететінін дәлелдеді.



4-сурет – Leica DM оптикалық микроскобы

Нәтижелер мен талқылау

WAAM технологиясы және одан кейінгі илемдеу процесі нәтижесінде үлгілер дайындалды. Алынған үлгілердің өлшемдік сипаттамалары келесідей: ұзындығы – 102 мм, биіктігі – 17,6 мм, бір қабаттың қалыңдығы – 3,6 мм (5а-сурет). Осындай құрылымда 1 дана үлгі дайындалып, 7 қатардан тұратын дәнекерленген қабаттардан қалыптастырылды. Металл қабаттары бір бағытта жүйелі түрде жүргізілді.

Салыстыру мақсатында дәл осы параметрлер мен дәнекерлеу режимі сақтала отырып, илемдеусіз үлгілер (5ә-сурет) де алынды. Алынған үлгілердің өлшемдік сипаттамалары: ұзындығы – 102 мм, биіктігі – 22,4 мм, бір қабаттың қалыңдығы – 3,7 мм. Осындай құрылымда 1 дана үлгі дайындалып, 7 қатардан тұратын дәнекерленген қабаттардан қалыптастырылды. Бұл үлгілер WAAM әдісімен қалыптасқанымен, қабаттарға илемдеу қолданылған жоқ.



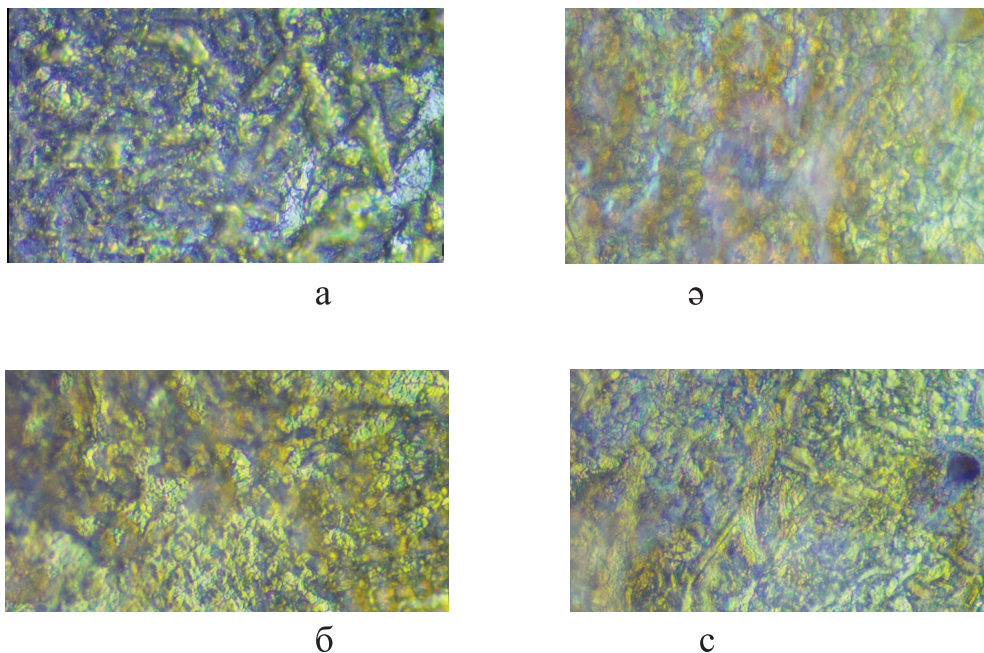
а



б

5-сурет – WAAM технологиясы бойынша алынған үлгілердің салыстырмалы көрінісі: а – дәнекерлеумен үйлескен илемдеу арқылы қалыптастырылған үлгі; б – илемдеусіз алынған бастапқы үлгі

Зерттеу нәтижелері илемделген және илемдеусіз жағдайдағы құрылымның айтарлықтай айырмашылықтарын көрсетті. Илемделген үлгілерде (6а-сурет) дәндердің ұсақталғаны, белгілі бір бағытта созылғаны және құрылымның біртекті болғаны байқалады. Бұл пластикалық деформация нәтижесінде металл құрылымының тығыздалып, шлак пен микрожарықтардың азаюына себеп болғанын көрсетеді. Сонымен қатар, жанынан қарағанда (6б-сурет) дәндердің айқын бағытталуы мен қайта кристалдану белгілері көрінеді, бұл илемдеудің құрылымға елеулі әсер еткенін растайды. Мұндай құрылым қалдық кернеулердің төмендеуіне және механикалық қасиеттердің жақсаруына ықпал етеді. Салыстыру барысында, илемдеусіз үлгілерде (6а-сурет) құрылымның анизотропиясы мен гетерогенділігі анық байқалды. Жанынан қараған кезде (6б-сурет) дәндер әртүрлі бағытта орналасқан, мөлшері әркелкі және қабатаралық шекаралар ішінара көрініп тұр. Бұл WAAM технологиясының қабаттап дәнекерлеу ерекшеліктерінен туындайтын құрылымдық айқынсыздық пен термиялық циклдердің қайталануының салдары болып табылады. Сонымен қатар ірі және бағытсыз дәндермен қоса, феррит пен перлит фазалары араласқан, бұл құрылымның макроскопиялық кемшіліктерін және механикалық қасиеттердің әркелкілігін көрсетеді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер WAAM әдісімен өндірілген үлгілерге илемдеуді қолдану арқылы құрылымның айтарлықтай жақсаруына қол жеткізуге болатынын дәлелдейді. Илемдеу дәндердің ұсақталуына, құрылымның біркелкіленуіне және қалдық кернеудің төмендеуіне ықпал етіп, материалдың беріктігі мен сенімділігін арттырады. Ал илемдеусіз үлгілерде керісінше, ақаулар, ірі дәндер және қабатаралық құрылымның сақталуы материалдың механикалық қасиеттеріне кері әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Зерттеу барысында илемдеуді тек бір жағынан жүргізу кезінде дәнекерлеу процесінде қабаттың бүйірге жайылып кету ықтималдығы байқалды. Осыған байланысты, келесі зерттеу жұмыстарында илемдеуді бір жақты емес, үш бағытта – жан-жақтан қысым түсіру арқылы жүргізу мүмкіндігін қарастыру ұсынылады.



6-сурет – Илемделген және илемдеусіз WAAM үлгілерінің микроқұрылымдық айырмашылықтары:

- а – илемдеусіз үлгідегі бағытсыз, ұсақталған дәндер;
- ә – бастапқы құрылымдағы қабатаралық ақаулардың байқалуы;
- б – илемдеу әсерінен дәндердің созылуы, бағытталуы және тығыздалуы;
- с – илемдеу дәрежесі жоғары болған кездегі анизотропияның төмендеуі мен құрылымдық біркелкіліктің артуы

Алынған нәтижелерде шетелдік зерттеулермен салыстырғанда, ұқсас үрдістер байқалады. Мысалы, Colegrove авторлар WAAM әдісімен алынған бөлшектерде қабатаралық құрылымның айқындылығы, дәндердің байқалуы және анизотропиялық қасиеттердің туындауы сынды макроқұрылымдық кемшіліктерді атап өткен [8]. Härtel және авторлар WAAM әдісімен алынған үлгілерде қабатаралық микроструктураның біркелкі еместігі мен қалдық кернеулердің өнімнің механикалық сенімділігіне кері әсер ететінін атап өткен [9]. WAAM процесінде қабатаралық күту уақыты тым қысқа болған жағдайда, дәндердің бақылаусыз өсуі салдарынан ірі дәндер, құрылымның біркелкі еместігі, қалдық кернеулер және анизотропиялық қасиеттерге әкелетін ақаулар қалыптасатыны айқындалды. [10]. Бұл мәселелер біздің зерттеу жұмысымызда да байқалды, және оны қабаттық илемдеу арқылы жеңілдету мүмкіндігі қарастырылды.

Қаржыландыру туралы ақпарат

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

Қорытынды

Бұл зерттеу жұмысында WAAM технологиясымен дайындалған ER70S-6 болат үлгілеріне қабатаралық илемдеудің құрылымдық қасиеттеріне әсері тәжірибелік жолмен зерттелді. Зерттеудің негізгі жаңалығы – бөлшек илемдеу процесінің WAAM технологиясынан кейін бірден орындалуында. Алынған нәтижелерге сүйенсек, қабатаралық илемдеу дән құрылымын айтарлықтай ұсақтап, қабатаралық шекараларды жойып, құрылымның біртектілігін арттырған. Илемделген үлгілерде кеуектілік пен анизотропия деңгейі төмендеп, қабатаралық байланыс сапасы жақсарғаны байқалды. Ал илемдеусіз үлгілерде қабатаралық ақаулар, микрожарықтар және ірі дән құрылымы сақталған. Бұл илемдеудің құрылым тығыздығына және макроқұрылымдық тұтастыққа оң әсер ететінін көрсетті. Зерттеу WAAM технологиясының кемшіліктерін жоюда қабатаралық пластикалық деформацияны қолдану – тиімді тәсіл екенін дәлелдеді.

Тәжірибелік жұмыстың нәтижелері WAAM технологиясын жетілдіруде илемдеудің интеграциялануы маңызды рөл атқаратынын және бұл тәсілдің аддитивті өндіріс өнімдерінің сапасын арттыруда тиімді құрал бола алатынын көрсетті. Болашақ зерттеу жұмыстары илемдеуді жан-жақты (үш бағытта) қысым түсіру арқылы жүргізу, деформация әсерін модельдеу, сондай-ақ алынатын құрылымдардың механикалық қасиеттерін толық сипаттау бағытында жалғасуы қажет.

REFERENCES

- 1 DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A. D., De, A. and Zhang, W. Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties // Progress in materials science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>.
- 2 Colegrove, P. A., Martina, F., Roy, M. J., Szost, B. A., Terzi, S., Williams, S. W. Withers, P. J. and Jarvis, D. High pressure interpass rolling of wire+ arc additively manufactured titanium components // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 996. – P. 694–700. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.694>.
- 3 Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. and Li, H. «Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests» // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81. – № 1. – P. 465–481. – <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
- 4 Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G. and Colegrove, P. Wire+ arc additive manufacturing // Materials science and technology. – 2016. – Vol. 32(7). – P. 641–647. – <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.00000000073>.
- 5 Martina, F., Roy, M.J., Szost, B.A., Terzi, S., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Withers, P.J., Meyer, J. and Hofmann, M. Residual stress of as-deposited and rolled wire+ arc additive manufacturing Ti–6Al–4V components // Materials Science

and Technology. – 2016. – Vol. 32. – № 14. – P. 1439–1448. – <https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1142704>.

6 Hönnige, J. R., Colegrove, P. A., Ahmad, B., Fitzpatrick, M. E., Ganguly, S., Lee, T. L. and Williams, S. W. Residual stress and texture control in Ti-6Al-4V wire+ arc additively manufactured intersections by stress relief and rolling // Materials & Design. – 2018. – Vol. 150. – P. 193–205. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.065>.

7 Abbaszadeh, M., Hönnige, J. R., Martina, F., Neto, L., Kashaev, N., Colegrove, P., Williams, S., and Klusemann, B. Numerical investigation of the effect of rolling on the localized stress and strain induction for wire+ arc additive manufactured structures // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol.28. – № 8. – P. 4931–4942. – <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04249-y>.

8 Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H. and Cozzolino, L. D. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213. – № 10. – P. 1782–1791. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>.

9 Härtel, S., Adams, T. E., Hofer, K., Awiszus, B. and Mayr, P. A Novel Method for Improving Weld Seam Properties through Inline Coupling of Welding and Forming // Materials. – 2020. – Vol. 13. – № 2. – P. 271. – <https://doi.org/10.3390/ma13020271>.

10 Singh, S., Jinoop, A. N., Tarun Kumar, G. T. A., Palani, I. A., Paul, C. P. and Prashanth, K. G. Effect of interlayer delay on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured wall structures // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 15 – P. 4187. – <https://doi.org/10.3390/ma14154187>.

12.06.25 ж. баспаға түсті.

30.10.25 ж. түзетулерімен түсті.

24.11.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

***А. К. Байбатша¹, Е. З. Нұрман², А. Қ. Мустафа³, И. М. Дюсебаев⁴**

^{1,2,3}Сатпаев университет, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴ТОО «Алматинский электрощитовой завод»,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 12.06.25.

Поступило с исправлениями 30.10.25.

Принято в печать 24.11.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕЖСЛОЙНОЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ WAAM

В современной промышленности наблюдается растущий спрос на эффективное, быстрое и экономичное производство металлических деталей сложной формы и крупных размеров. Для удовлетворения этой потребности всё шире применяются технологии аддитивного производства, в частности, доуговое аддитивное изготовление WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Однако одним из основных недостатков WAAM является частое возникновение таких структурных дефектов, как межслойные границы, анизотропия, микротрещины и пористость. В этой связи в представленном исследовании рассматривается возможность улучшения качества структуры за счёт интеграции MIG-сварки с межслойной прокаткой, выполняемой сразу после каждого нанесённого слоя. Целью является измельчение зерна и повышение плотности и однородности структуры путём пластической деформации свеженанесённого слоя. Образцы из стали ER70S-6 были исследованы с использованием оптического микроскопа Leica DMI8, а влияние прокатки оценивалось на макро- и микроструктурном уровнях. Результаты показали, что в прокатанных образцах устраняются межслойные границы, существенно снижается пористость и анизотропия, формируется однородная мелкозернистая структура. Это подтверждает, что межслойная прокатка может быть эффективным инструментом для устранения структурных дефектов в технологии WAAM и повышения качества готовой продукции. В дальнейшем предлагается усовершенствование метода за счёт применения многовекторного давления и численного моделирования процессов деформации.

Ключевые слова: аддитивное производство, технология WAAM, MIG-сварка, межслойная прокатка, структурный анализ, микроструктура, пластическая деформация, сталь ER70S-6.

*A. K. Baibatsha¹, E. Z. Nugman², A. K. Mustafa³, I. M. Dyussebayev⁴

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

⁴LLP «Almaty Electric Switchgear Plant», Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 12.06.25.

Received in revised form 30.10.25.

Accepted for publication 24.11.25.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INTERPASS ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE OF WAAM-FABRICATED SAMPLES

In modern industry, the demand for efficient, rapid, and cost-effective production of complex-shaped and large-sized metal parts is steadily increasing. To meet this need, additive manufacturing technologies, particularly WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – are being widely adopted. However, one of the major drawbacks of WAAM is the frequent occurrence of structural defects such as interlayer boundaries, anisotropy, microcracks, and porosity. In this context, the present study explores the potential for improving the structural quality of WAAM-fabricated parts by integrating MIG welding with interlayer rolling applied immediately after each deposited layer. The aim was to refine grain size and increase the density and homogeneity of the structure by subjecting the freshly deposited layer to plastic deformation. Samples made from ER70S-6 steel were analyzed using a Leica DMI8 optical microscope, and the structural effects of rolling were evaluated at both the macro and microstructural levels. The results revealed that in rolled samples, interlayer boundaries were eliminated, porosity and anisotropic features were significantly reduced, and a fine and homogeneous grain structure was formed. These findings confirm that interlayer rolling can be an effective tool to minimize structural imperfections in WAAM and enhance the final product quality. Future improvements may include the application of multidirectional pressure and numerical modeling of the deformation process for further optimization.

Keywords: additive manufacturing, WAAM technology, MIG welding, interlayer rolling, structural analysis, microstructure, plastic deformation, ER70S-6 steel.

Теруге 01.12.25 ж. жіберілді. Басуға 30.12.25 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
328 Mb RAM
Шартты баспа табағы 30,96 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4463

«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