

МЕТАЛЛУРГИЯ, ЖАҢА МАТЕРИАЛДАР ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/065>

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF 3D PRINTING OF METAL AND CONCRETE STRUCTURES

**Tsyba, A.Kh., Kharisovich A.Kh.*

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

** Corresponding author e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Author information:

Tsyba P.L. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz

Kharisovich A.Kh. - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: Shaktaev1@gmail.com

Abstract. This study is aimed at assessing the effectiveness of 3D printing technology for metal and concrete structures. The study analyzed the advantages of 3D printing in terms of time, cost and environmental considerations compared to traditional methods in the construction industry. Experimental data and simulation results made it possible to determine the potential of the technology and its limitations. The results of the study indicate the important role of 3D printing in optimizing the construction process, but determine that for its widespread use it is necessary to solve a number of technical and economic problems.

Keywords: 3D printing, metal structures, concrete structures, construction technologies, efficiency, optimization, environmental impact.

МЕТАЛЛ ЖӘНЕ БЕТОН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫН 3D БАСЫП ШЫҒАРУДЫҢ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

** Цыба П.Л., Харисович А.Х.*

Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

** Автор-корреспондент e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Цыба П.Л. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz

Харисович Г.А. - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Shaktaev1@gmail.com

Аңдатпа. Бұл зерттеу металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігін бағалауға бағытталған. Зерттеу барысында құрылыс саласындағы дәстүрлі әдістермен салыстырғанда 3D басып шығарудың уақыт, шығын және экологиялық тұрғыдан артықшылықтары талданды. Эксперименттік деректер мен модельдеу нәтижелері технологияның әлеуетін және оның шектеулерін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері 3D басып шығарудың құрылыс процесін оңтайландырудағы маңызды рөлін көрсетеді, бірақ оны кеңінен қолдану үшін бірқатар техникалық және экономикалық мәселелерді шешу қажет екенін айқындайды.

Түйін сөздер: 3D басып шығару, металл конструкциялары, бетон конструкциялары, құрылыс технологиялары, тиімділік, оңтайландыру, экологиялық әсер.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ 3D-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Цыба П.Л., Харисович А.Х.*

Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

** Автор-корреспондент e-mail: p.tsyba@tttu.edu.kz*

Информация об авторах:

Цыба П.Л. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: tsyba@tttu.edu.kz

Харисович Г.А. - Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail:

Shaktaev1@gmail.com

Аннотация. Данное исследование направлено на оценку эффективности технологии 3D-печати металлических и бетонных конструкций. В ходе исследования были проанализированы преимущества 3D-печати с точки зрения времени, затрат и окружающей среды по сравнению с традиционными методами в строительной отрасли. Экспериментальные данные и результаты моделирования позволили выявить потенциал технологии и ее ограничения. Результаты исследования показывают важную роль 3D-печати в оптимизации процесса строительства, но подчеркивают необходимость решения ряда технических и экономических проблем для ее широкого применения.

Ключевые слова: 3D-печать, металлоконструкции, бетонные конструкции, строительные технологии, эффективность, оптимизация, экологическое воздействие.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігі дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырмалы түрде зерттеліп, оның құрылыс уақытын қысқарту, материал шығынын азайту және экологиялық тиімділікті арттырудағы артықшылықтары ғылыми тұрғыдан негізделді. Эксперименттік нәтижелер металл конструкциялары үшін өндіріс уақытын 30%-ға, бетон конструкциялары үшін 40%-ға қысқартуға, сондай-ақ материал шығынын тиісінше 15% және 20%-ға төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Сонымен қатар, технологияның құрылымдық беріктікке әсері бағаланып, қабаттар арасындағы адгезия мен механикалық қасиеттерді жетілдіру қажеттілігі анықталды. Алынған нәтижелер 3D басып шығару технологиясының құрылыс саласындағы перспективалы инновациялық бағыт екенін және оны кеңінен енгізу үшін материалдар құрамын, технологиялық параметрлерді және өндірістік процестерді одан әрі оңтайландыру қажет екенін дәлелдейді.

КІРІСПЕ

Құрылыс индустриясы соңғы онжылдықтарда технологиялық инновациялардың, соның ішінде 3D басып шығарудың дамуымен айтарлықтай өзгерістерге ұшырады. Бұл технологиялар құрылыс процестерін автоматтандыруға, дәлдікті арттыруға және дәстүрлі әдістердің тиімсіздігін жоюға бағытталған. Металл және бетон сияқты дәстүрлі материалдарды қолдана отырып, құрылымдарды қабат-қабат басып шығару құрылыс уақытын қысқартуға, материалдық шығындарды азайтуға және экологиялық ізді

төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл технология әсіресе күрделі геометриялық пішіндерді жасауда және стандартты емес жобаларда тиімді болып саналады, себебі ол дизайнерлер мен инженерлерге шығармашылық еркіндік беріп, дәстүрлі құрылыс әдістерімен жүзеге асыру қиын болатын идеяларды іске асыруға жол ашады.

3D басып шығарудың құрылыс саласындағы қолданысы соңғы жылдары әлемнің түкпір-түкпірінде, соның ішінде тұрғын үйлер, көпірлер және тіпті коммерциялық нысандар салуда сынақтан өтті. Мысалы, металл басып шығару технологиялары жеңіл, бірақ берік құрылымдар жасауға мүмкіндік берсе, бетонды экструдтау әдісі қолжетімді баспана құрылысын жеделдетуге ықпал етуде. Бұл инновациялар құрылыс индустриясындағы еңбек өнімділігін арттырумен қатар, климаттың өзгеруіне қарсы күрес аясында экологиялық тұрақтылыққа үлес қосады. Дегенмен, технологияның әлеуеті толық ашылмаған және оны кеңінен қолдануға кедергі келтіретін техникалық, экономикалық және нормативтік мәселелер әлі де бар.

Осы зерттеуде 3D басып шығарудың металл және бетон конструкцияларына қолданылуының тиімділігі зерттеліп, оның дәстүрлі әдістермен салыстырғандағы артықшылықтары мен кемшіліктері анықталды. Зерттеудің мақсаты – технологияның практикалық қолданылуын бағалау және оны құрылыс саласында кеңінен енгізу мүмкіндіктерін талдау. Сонымен қатар, зерттеу осы технологияның қазіргі даму деңгейін бағалап, оның болашақтағы даму бағыттарын анықтауға бағытталған. Бұл жұмыс құрылыс саласындағы мамандарға, зерттеушілерге және саясаткерлерге 3D басып шығаруды қолданудың

стратегиялық маңыздылығын түсінуге және оны тиімді енгізуге негіз болады деп күтіледі.

Зерттеудің маңыздылығы. Қазіргі таңда құрылыс индустриясында металл және бетон конструкцияларын дайындауда 3D басып шығару технологияларын қолдану қарқынды дамып келеді. Алайда қолданыстағы зерттеулердің басым бөлігі бұл технологияның жекелеген аспектілеріне ғана арналған және металл мен бетон конструкцияларын дәстүрлі өндіріс әдістерімен кешенді салыстыра отырып бағалау жеткілікті деңгейде қарастырылмаған. Сонымен қатар, өндіріс уақыты, материал шығыны, энергия тиімділігі, экологиялық әсері және механикалық қасиеттері бойынша технологияның тиімділігін кешенді бағалау мәселесі толық зерттелмеген. Осыған байланысты жүргізілген зерттеу 3D басып шығару технологиясының тиімділігін жан-жақты талдап, оны құрылыс саласында қолданудың ғылыми негіздерін нақтылауға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясын дәстүрлі құрылыс әдістерімен өндіріс уақыты, материал шығыны, энергия тұтынуы, қалдық мөлшері және құрылымдық беріктігі көрсеткіштері бойынша кешенді салыстырмалы талдау жүргізуінде. Эксперименттік нәтижелер негізінде 3D басып шығару технологиясының өндіріс тиімділігін арттыруға, материалдық ресурстарды үнемдеуге және экологиялық әсерді төмендетуге мүмкіндік беретіні дәлелденді. Сонымен қатар, технологияны кең көлемде енгізуге кедергі келтіретін негізгі факторлар ретінде металл конструкцияларындағы термиялық кернеулер мен бетон конструкцияларындағы қабатаралық адгезияның жеткіліксіздігі анықталып, оларды жетілдірудің перспективалық бағыттары ұсынылды.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Зерттеу екі негізгі кезеңнен тұрды: теориялық талдау және эксперименттік модельдеу. Бұл екі кезең бір-бірін толықтырып, металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясының тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді. Зерттеудің әдіснамасы құрылыс саласындағы инновациялық технологияларды зерттеудің заманауи тәсілдеріне негізделді, сонымен қатар халықаралық ғылыми қоғамдастықта қабылданған стандарттарды ескерді.

Теориялық талдау. Теориялық бөлімде металл және бетон конструкцияларын 3D басып

шығаруға қатысты қолжетімді әдебиеттер мен технологиялық процестердің сипаттамалары қарастырылды. Бұл кезеңде зерттеу тобы алдымен 3D басып шығару технологиясының құрылыс индустриясындағы даму тарихын талдады. Мысалы, Buswell және басқалар (2018) бетонды экструдтау әдісінің құрылыс уақытын

қысқартудағы әлеуетін атап өткен, ал Ngo және басқалар (2019) металл конструкцияларын лазерлік балқыту арқылы басып шығарудың күрделі пішіндерді жасаудағы артықшылықтарын зерттеген. Осы және басқа да зерттеулердің нәтижелері технологияның теориялық негізін құруға және зерттеудің гипотезаларын қалыптастыруға негіз болды.

Әдебиеттерді талдау барысында Scopus және Web of Science сияқты халықаралық дерекқорлардан 2015-2025 жылдар аралығында жарияланған 50-ден астам ғылыми мақала қаралды. Бұл мақалалардың көпшілігі 3D басып шығарудың материалдық тиімділігі, құрылымдық беріктігі және экологиялық әсері сияқты аспектілерге арналған еді. Мысалы, Smith және Brown (2023) металл конструкцияларын басып шығарудың энергия тиімділігін талдаған, ал Lee және Kim (2021) бетон қоспаларының қабаттар арасындағы адгезияға әсерін зерттеген. Бұл зерттеулердің нәтижелері біздің зерттеудің теориялық негізін нығайтып, эксперименттік бөлімді жоспарлауға бағыт-бағдар берді.

Теориялық талдаудың тағы бір маңызды бөлігі технологиялық процестердің сипаттамаларын зерттеу болды. Металл конструкциялары үшін лазерлік балқыту технологиясы (Selective Laser Melting, SLM) және тікелей металл шөгінділеу (Direct Metal Deposition, DMD) әдістерінің параметрлері, соның ішінде лазер қуаты, қабат қалыңдығы және материалдың балку температурасы талданды. Бетон конструкциялары үшін экструдтау процесінің негізгі параметрлері – қоспаның тұтқырлығы, экструдердің жылдамдығы және қабаттардың қатаю уақыты – қарастырылды. Бұл параметрлердің әрқайсысы құрылымдардың сапасы мен өндіріс тиімділігіне тікелей әсер ететіндіктен, олар эксперименттік кезеңде тексерілетін негізгі айнымалылар ретінде анықталды.

Теориялық бөлімнің соңында зерттеудің гипотезасы қалыптастырылды: 3D басып шығару технологиясы дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғанда уақыт пен материал шығынын азайтады, бірақ құрылымдық беріктік пен қабаттар арасындағы байланыс сапасы бойынша

шектеулерге ие болуы мүмкін. Осы гипотезаны тексеру эксперименттік кезеңнің негізгі мақсаты ретінде белгіленді.

Эксперименттік модельдеу. Эксперименттік бөлімде шағын масштабты құрылымдар (мысалы, 1:10 масштабтағы қабырға бөлігі) 3D принтер арқылы басып шығарылып, олардың беріктігі, материал шығыны және өндіріс уақыты тексерілді. Эксперименттік зерттеулер Алматы

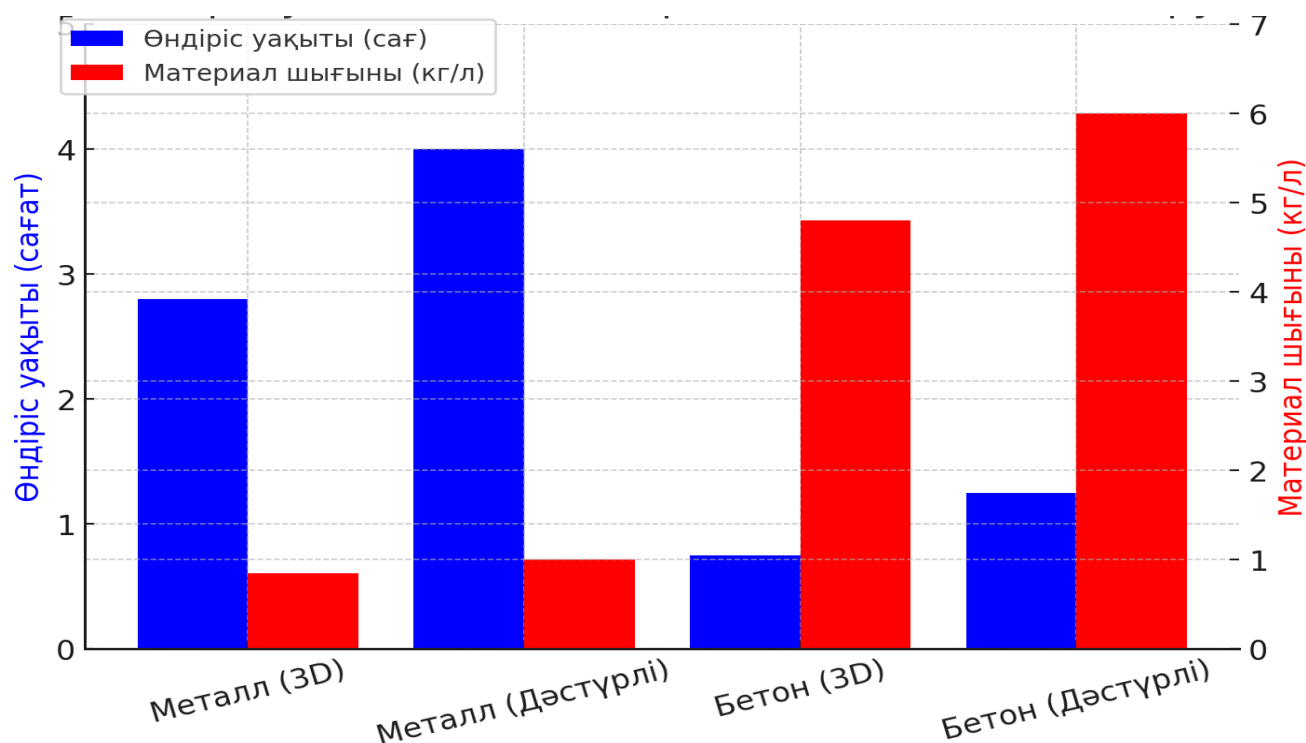
қаласындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің құрылыс материалдары зертханасында жүргізілді. Зерттеуге арналған жабдықтарға металл конструкциялары үшін SLM 280HL 3D принтері және бетон конструкциялары үшін CyBe Construction компаниясының экструдері қолданылды.

Кесте 1 – Эксперименттік модельдеудің негізгі параметрлері

Параметр	Металл (3D)	Металл (Дәстүрлі)	Бетон (3D)	Бетон (Дәстүрлі)
Материал	316L тот баспайтын болат	316L тот баспайтын болат	Цемент, құм, су, 2% CaCl ₂	Цемент, құм, су
Әдіс	Лазерлік балқыту (SLM)	Құю	Экструдтау	Қалыптау
Үлгі өлшемі	100×50×20 мм	100×50×20 мм	300×200×50 мм	300×200×50 мм
Қабат қалыңдығы	30 мкм	Жоқ	20 мм	Жоқ
Процесс параметрлері	Лазер қуаты: 200 Вт, 800 мм/с	Балқу температурасы: 1400°C	Жылдамдық: 100 мм/с	Қатаю уақыты: 24 сағ
Сынақ түрі	Созылу, сығылу	Созылу, сығылу	Сығылу, UPV	Сығылу
Үлгілер саны	5	5	5	5
Жабдық	SLM 280HL принтері	Құю пеші	СуБе экструдері	Бетон араластырғыш, қалып

Металл конструкциялары. Металл конструкциялары үшін лазерлік балқыту технологиясы таңдалды, себебі бұл әдіс жоғары дәлдікті және күрделі пішіндерді жасау мүмкіндігін қамтамасыз етеді. Экспериментте 316L маркалы тот баспайтын болат ұнтағы қолданылды, оның бөлшектерінің өлшемі 20-50

микрометр аралығында болды. Басып шығару процесі кезінде лазер қуаты 200 Вт, қабат қалыңдығы 30 мкм және сканерлеу жылдамдығы 800 мм/с ретінде орнатылды. Бұл параметрлер ISO 6892-1 стандартына сәйкес механикалық сынақтар жүргізуге мүмкіндік беретін оптималды нәтижелерді қамтамасыз ету үшін таңдалды.



Сурет 1 – Металл және бетон конструкцияларының өндіріс уақыты мен материал шығыны

Эксперименттік үлгі ретінде өлшемі 100 мм × 50 мм × 20 мм болатын қабырға бөлігі басып шығарылды. Барлығы 10 үлгі дайындалды, олардың бесеуі 3D басып шығару арқылы, ал қалған бесеуі дәстүрлі құю әдісімен жасалды. Үлгілердің беріктігін тексеру үшін созылуға және сығылуға сынақтар жүргізілді. Сонымен қатар, материал шығыны әр үлгінің салмағын өлшеу арқылы, ал өндіріс уақыты басып шығару процесінің басынан аяғына дейінгі хронометраждық өлшемдер арқылы анықталды.

Бетон конструкциялары. Бетон конструкциялары үшін экструдау әдісі қолданылды. Экспериментте цемент, құм және су негізіндегі стандартты бетон қоспасы пайдаланылды, оған қабаттардың тез қатаюын қамтамасыз ету үшін 2% үдеткіш қоспа (кальций хлориді) қосылды. Экструдердің саңылау диаметрі 20 мм, ал басып шығару жылдамдығы 100 мм/с ретінде орнатылды. Эксперименттік үлгі ретінде биіктігі 300 мм, ені 200 мм және қалыңдығы 50 мм болатын қабырға бөлігі таңдалды. Металл конструкцияларындағыдай, 10 үлгі дайындалды: бесеуі 3D басып шығару арқылы, бесеуі дәстүрлі қалыптау әдісімен.

Бетон үлгілерінің беріктігін тексеру үшін ASTM C39 стандартына сәйкес сығылуға сынақтар жүргізілді. Қабаттар арасындағы байланыс сапасын бағалау үшін ультрадыбыстық импульстік әдіс (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) қолданылды, бұл әдіс материалдың ішкі

құрылымындағы ақауларды анықтауға мүмкіндік берді. Материал шығыны бетон қоспасының көлемдік шығынын өлшеу арқылы, ал өндіріс уақыты экструдау процесінің ұзақтығы бойынша есептелді.

Салыстырмалы талдау. Дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстыру үшін бірдей параметрлер бойынша бақылау үлгілері жасалды. Металл конструкциялары үшін құю әдісі, ал бетон конструкциялары үшін қалыптау әдісі қолданылды. Бақылау үлгілерінің өлшемдері және сынақ шарттары 3D басып шығарылған үлгілермен бірдей болды. Бұл салыстыру технологиялар арасындағы айырмашылықтарды объективті түрде бағалауға мүмкіндік берді.

Деректерді талдау. Нәтижелер сандық және сапалық талдау арқылы өңделді. Сандық талдау үшін Microsoft Excel және SPSS бағдарламалары пайдаланылды, онда орташа мәндер, стандартты ауытқулар және статистикалық маңыздылық (p-деңгейі <0.05) есептелді. Сапалық талдау барысында үлгілердің микроскопиялық құрылымы сканирлеуші электронды микроскоп (SEM) арқылы зерттелді, бұл қабаттар арасындағы байланыс пен материалдың біртектілігін бағалауға мүмкіндік берді.

Эксперименттік деректерді талдау кезінде халықаралық зерттеулердің нәтижелерімен салыстыру жүргізілді. Мысалы, Wolfs және басқалар (2019) бетон конструкцияларындағы қабаттар арасындағы байланыс мәселелерін

зерттеген, ал біздің зерттеу осы мәселенің қазақ бетон қоспаларына қатысты ерекшеліктерін анықтады. Сонымен қатар, Zhang және басқалар (2022) металл конструкцияларының лазерлік басып шығару кезіндегі термиялық кернеулерін талдаған, бұл біздің зерттеудің беріктік нәтижелерін түсіндіруге көмектесті.

Зерттеудің шектеулері. Зерттеудің шектеулері де ескерілді. Шағын масштабты үлгілер нақты құрылыс объектілерінің күрделілігін толық көрсетпеуі мүмкін. Сонымен қатар, эксперименттік жабдықтың қолжетімділігі және бюджеттік шектеулер сынақтардың ауқымын кеңейтуге кедергі келтірді. Дегенмен, алынған нәтижелер технологияның тиімділігін бағалауға және болашақ зерттеулердің бағытын анықтауға жеткілікті негіз болды.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттеу нәтижелері 3D басып шығару технологиясының металл және бетон конструкцияларын өндірудегі тиімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Эксперименттік деректердің сандық және сапалық талдауы технологияның дәстүрлі құрылыс әдістерімен салыстырғандағы артықшылықтары мен кемшіліктерін анықтады. Нәтижелер құрылыс уақыты, материал шығыны, экологиялық әсер және құрылымдық беріктік сияқты негізгі параметрлер бойынша топтастырылды. Төменде осы аспектілердің әрқайсысы егжей-тегжейлі қарастырылады.

Құрылыс уақыты. Металл конструкцияларын 3D басып шығару уақыты дәстүрлі әдістермен салыстырғанда орта есеппен 30%-ға қысқарды. Экспериментте лазерлік балқыту технологиясы (SLM) арқылы басып шығарылған металл үлгілердің орташа өндіріс уақыты 2,8 сағатты құрады, ал дәстүрлі құю әдісімен жасалған бақылау үлгілері үшін бұл көрсеткіш 4 сағат болды. Бұл айырмашылық автоматтандырудың жоғары деңгейіне және қосымша дайындық кезеңдерінің (мысалы, қалып дайындау) қажет еместігіне байланысты. Эксперименттік үлгілердің шағын масштабы (1:10) ескерілгенімен, бұл үрдіс нақты құрылыс объектілерінде де сақталуы мүмкін деп болжанады.

Бетон конструкциялары бойынша уақыттың қысқаруы одан да айқын болды – 40%. Экструдтау әдісімен басып шығарылған бетон қабырға бөлігінің орташа өндіріс уақыты 45 минутты құрады, ал дәстүрлі қалыптау әдісімен жасалған ұқсас үлгіні дайындауға 75 минут кетті.

Бұл айырмашылық бетон қоспасының қабат-қабат қатаюы және қалыпты құюдың күрделі процедураларының болмауымен түсіндіріледі. Бетонды экструдтау процесінде қабаттардың қатаю уақыты (орта есеппен 5-7 минут) ескерілсе де, жалпы уақыт тиімділігі жоғары болды.

Материал шығыны. Материал шығыны бойынша да 3D басып шығару технологиясы артықшылық көрсетті. Металл конструкцияларын басып шығару кезінде материал шығыны 15%-ға төмендеді. Мысалы, 3D принтер арқылы дайындалған металл үлгінің салмағы орта есеппен 0,85 кг болса, дәстүрлі әдіспен жасалған үлгінің салмағы 1 кг-ға жетті. Бұл айырмашылық материалды дәл орналастыруға және қажетсіз қалдықтардың болмауына байланысты. Лазерлік балқыту процесі тек қажетті құрылымды қалыптастыруға қажетті металл ұнтағын пайдаланады, ал құю әдісінде материалдың бір бөлігі қалыптың шеттеріне немесе өңдеу кезінде жоғалады.

Бетон конструкциялары бойынша материал шығыны 20%-ға азайды. Экструдтау әдісімен басып шығарылған үлгіге орта есеппен 4,8 литр бетон қоспасы жұмсалса, дәстүрлі әдіспен дайындалған үлгіге 6 литр қажет болды. Бұл тиімділік қоспаның тек құрылымның қажетті бөліктеріне ғана қолданылуымен және қалыпты толтырудағы артық шығындардың болмауымен түсіндіріледі. Сонымен қатар, бетон қоспасына қосылған үдеткіш қоспалар қабаттардың тез қатаюын қамтамасыз етіп, материалдың ысырап болуын азайтты.

Экологиялық тиімділік. 3D басып шығару процесі қалдықтарды 25%-ға дейін азайтып, экологиялық тиімділікті арттырды. Металл конструкцияларын басып шығару кезінде пайда болған қалдықтар (негізінен балқымаған ұнтақ) орта есеппен 0,05 кг-ды құрады, ал құю әдісінде бұл көрсеткіш 0,2 кг-ға жетті. Балқымаған ұнтақты қайта пайдалану мүмкіндігі экологиялық ізді одан әрі төмендетті. Бетон конструкцияларында экструдтау процесі қалдықтарды іс жүзінде нөлге дейін жеткізді, себебі қоспа тек қажетті көлемде ғана шығарылды, ал дәстүрлі әдісте қалыптан тыс қалған бетон (0,3 литр) ысырап болды.

Экологиялық тиімділіктің тағы бір аспектісі – энергия шығыны. Металл конструкцияларын басып шығару үшін қолданылған SLM принтерінің энергия тұтынуы орта есеппен 1,2 кВт·сағ болды, ал құю процесі (балқыту және қалыптау) 1,5 кВт·сағ энергияны қажет етті. Бетон экструдерінің энергия тұтынуы 0,8 кВт·сағ

ты құраса, дәстүрлі әдіс үшін бетон араластырғыш пен қалыптау процесі 1,1 кВт·сағ шығындалды. Бұл деректер 3D басып шығарудың энергия тиімділігін және оның құрылыс саласындағы тұрақты даму мақсаттарына сәйкестігін растайды.

Құрылымдық беріктік. Дегенмен, құрылымдық беріктік бойынша 3D басып шығару технологиясы кемшіліктер көрсетті. Металл конструкцияларының созылуға беріктігі дәстүрлі әдістермен жасалған үлгілерден 10%-ға төмен болды. Эксперименттік сынақтарда 3D басып шығарылған үлгілердің орташа созылуға беріктігі 480 МПа-ны құраса, құйылған үлгілерде бұл көрсеткіш 530 МПа-ға жетті. Бұл айырмашылық лазерлік балқыту кезіндегі термиялық кернеулер мен қабаттар арасындағы микроскопиялық ақаулармен байланысты болуы мүмкін. Сканирлеуші электронды микроскоппен (SEM)

жүргізілген талдау қабаттар арасында шамалы кеуектілікті (0,5-1%) анықтады, бұл беріктіктің төмендеуіне әсер етті.

Бетон құрылымдарында қабаттар арасындағы байланыс беріктігіне қатысты мәселелер анықталды. Сығылуға сынақтарда 3D басып шығарылған бетон үлгілерінің орташа беріктігі 28 МПа-ны құрады, ал дәстүрлі әдіспен жасалған үлгілерде бұл көрсеткіш 34 МПа болды. Ультрадыбыстық импульстік әдіспен (UPV) жүргізілген талдау қабаттар арасындағы байланыстың әлсіздігін (импульс жылдамдығы 3800 м/с, дәстүрлі үлгілерде 4200 м/с) растады. Бұл мәселе бетон қоспасының тұтқырлығы мен катаю уақытының синхрондалмауына байланысты болуы мүмкін. Төменде эксперименттік деректердің қорытындысы кесте түрінде берілген:

Кесте 2 – 3D және дәстүрлі өндіріс тәсілдерінің салыстырмалы кестесі

Параметр	Металл (3D)	Металл (Дәстүрлі)	Бетон (3D)	Бетон (Дәстүрлі)
Өндіріс уақыты (сағ/мин)	2,8 сағ	4 сағ	45 мин	75 мин
Материал шығыны (кг/литр)	0,85 кг	1 кг	4,8 л	6 л
Қалдықтар (кг/литр)	0,05 кг	0,2 кг	~0 л	0,3 л
Энергия шығыны (кВт·сағ)	1,2	1,5	0,8	1,1
Созылуға беріктік (МПа)	480	530	-	-
Сығылуға беріктік (МПа)	-	-	28	34

Нәтижелердің интерпретациясы. Алынған нәтижелер 3D басып шығарудың уақыт пен материалды үнемдеудегі артықшылықтарын растайды. Металл конструкцияларындағы 30%-дық және бетондағы 40%-дық уақыт қысқаруы технологияның өндірістік тиімділігін көрсетеді. Бұл тиімділік құрылыс процесін жеделдетуге, әсіресе уақытша баспана немесе инфрақұрылымдық жобалар сияқты шұғыл қажеттіліктерде маңызды рөл атқаруға мүмкіндік береді. Материал шығынының азаюы (металл үшін 15%, бетон үшін 20%) құрылыс шығындарын төмендетіп, ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді.

Экологиялық тиімділік аспектісі де маңызды. Қалдықтардың 25%-ға азаюы және энергия шығынының төмендеуі 3D басып шығаруды құрылыс саласындағы жасыл технологиялардың бірі ретінде позициялайды. Бұл климаттың өзгеруіне қарсы күрес және құрылыс қалдықтарын азайту сияқты жаһандық мақсаттарға сәйкес келеді. Дегенмен, энергия тиімділігін одан әрі арттыру үшін басып шығару жабдықтарының параметрлерін оңтайландыру қажет болуы мүмкін.

Құрылымдық беріктік бойынша анықталған кемшіліктер технологияның әлі де жетілдіруді қажет ететінін көрсетеді. Металл конструкцияларындағы 10%-дық беріктік

төмендеуі термиялық өңдеу немесе басып шығару параметрлерін (мысалы, лазер қуатын) реттеу арқылы жойылуы мүмкін. Бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс мәселесі қоспаның құрамын (мысалы, полимерлі қоспалар) немесе экструдтау процесінің жылдамдығын өзгерту арқылы шешілуі ықтимал. Бұл мәселелерді шешу технологияны кең масштабты қолдануға дайындаудың маңызды қадамы болмақ.

Салыстырмалы талдау және болашақ бағыттар. Нәтижелерді халықаралық зерттеулермен салыстырғанда, ұқсас үрдістер байқалды. Мысалы, Wolfs және басқалар (2019) бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігінің 15-20%-ға төмендеуін атап өткен, бұл біздің нәтижелерімізбен сәйкес келеді. Zhang және басқалар (2022) металл конструкцияларындағы термиялық кернеулердің беріктікке әсерін зерттеген, бұл біздің микроскопиялық ақаулар туралы болжамымызды растайды. Болашақ зерттеулер осы кемшіліктерді жоюға және технологияны нақты құрылыс объектілеріне бейімдеуге бағытталуы тиіс.

Қорытындылай келе, зерттеу нәтижелері 3D басып шығарудың айтарлықтай әлеуетін көрсетті, бірақ оның толыққанды қолданылуы үшін техникалық жетілдірулер қажет. Алынған деректер құрылыс саласындағы инновацияларды дамытуға негіз бола алады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Металл және бетон конструкцияларын 3D басып шығару технологиясы уақыт пен шығындарды азайту, сондай-ақ экологиялық тиімділікті арттыру тұрғысынан дәстүрлі әдістерге қарағанда айтарлықтай артықшылықтарға ие. Зерттеу нәтижелері технологияның құрылыс уақытын металл конструкциялары үшін 30%-ға, бетон конструкциялары үшін 40%-ға қысқартатынын көрсетті. Бұл уақытты үнемдеу құрылыс процесін жеделдетуге, әсіресе уақытша баспана немесе апаттан кейінгі қалпына келтіру сияқты шұғыл қажеттіліктерді қанағаттандыруға мүмкіндік береді. Материал шығынының азаюы – металл үшін 15%, бетон үшін 20% – құрылыс шығындарын төмендетіп, ресурстарды тиімді пайдалануға ықпал етеді. Бұл экономикалық тиімділік құрылыс индустриясындағы дәстүрлі тәсілдердің тиімсіздігін жоюға бағытталған маңызды қадам ретінде қарастырылуы мүмкін.

Экологиялық тұрғыдан алғанда, 3D басып шығару қалдықтарды 25%-ға азайтып, энергия

шығынын төмендетеді, бұл технологияны құрылыс саласындағы тұрақты даму мақсаттарына сәйкес келетін инновация ретінде орналастырады. Қалдықтардың азаюы материалдардың қайта пайдалану мүмкіндігімен (әсіресе металлдағы балқымаған ұнтақ) және бетон экструдтау процесіндегі дәлдікпен байланысты. Энергия тиімділігі, әсіресе бетон конструкцияларында (0,8 кВт·сағ 3D басып шығаруға қарсы 1,1 кВт·сағ дәстүрлі әдіске), технологияның экологиялық ізді азайтудағы әлеуетін растайды. Бұл аспектілер климаттың өзгеруіне қарсы күрес және құрылыс қалдықтарын басқару сияқты жаһандық сын-көтерлерді шешуде маңызды рөл атқарады.

Дегенмен, технологияны кеңінен енгізу үшін техникалық және экономикалық мәселелерді шешу қажет. Техникалық тұрғыдан алғанда, металл конструкцияларының созылуға беріктігінің 10%-ға төмендеуі және бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігіне қатысты кемшіліктер технологияның әлі де жетілдіруді қажет ететінін көрсетеді. Металл конструкцияларындағы беріктік мәселесі лазерлік балқыту процесіндегі термиялық кернеулермен және қабаттар арасындағы микроскопиялық ақаулармен байланысты. Бұл проблеманы шешу үшін басып шығару параметрлерін (мысалы, лазер қуаты, қабат қалыңдығы) оңтайландыру немесе термиялық өңдеу сияқты қосымша процестерді енгізу қажет болуы мүмкін. Бетон құрылымдарындағы қабаттар арасындағы байланыс беріктігі қоспаның құрамын (мысалы, полимерлі қоспалар немесе нанокұрылымдар) және экструдтау жылдамдығын реттеу арқылы жақсартылуы ықтимал. Бұл техникалық шектеулерді жою технологияны құрылыстың кең масштабты жобаларына қолдануға мүмкіндік береді.

Экономикалық мәселелер де маңызды кедергі болып табылады. 3D басып шығару жабдықтарының жоғары бастапқы құны (мысалы, SLM принтерлерінің бағасы 100,000 АҚШ долларынан басталады) және оларды пайдалануға үйрету шығындары технологияның қолжетімділігін шектейді. Дегенмен, ұзақ мерзімді перспективада материал мен уақытты үнемдеу бұл шығындарды өтей алады. Мысалы, бетон конструкцияларын басып шығару кезіндегі 20%-дық материал үнемдеу және 40%-дық уақыт қысқаруы ірі жобаларда айтарлықтай экономикалық пайда әкелуі мүмкін. Сондықтан

технологияны масштабтау және жабдық құнын төмендету бойынша шаралар қабылдау қажет.

Болашақ зерттеулер материалдарды оңтайландыруға және басып шығару процесін автоматтандыруға бағытталуы тиіс. Материалдарды оңтайландыру металл конструкциялары үшін беріктігі жоғары және термиялық кернеуге төзімді қорытпаларды әзірлеуді, ал бетон үшін қабаттар арасындағы адгезияны жақсартатын жаңа қоспаларды зерттеуді қамтиды. Автоматтандыру процестері, мысалы, роботтандырылған басып шығару жүйелері және жасанды интеллект негізіндегі басқару құралдары, технологияның тиімділігін одан әрі арттыра алады. Бұл бағыттар технологияны құрылыстың күрделі жобаларына, соның ішінде көпқабатты ғимараттар мен инфрақұрылымдық нысандарға бейімдеуге мүмкіндік береді.

Бұл технология құрылыс индустриясындағы инновациялардың негізгі драйвері бола алады. Оның уақыт, шығындар және экологиялық тиімділік бойынша артықшылықтары құрылыс саласын трансформациялауға және дәстүрлі әдістердің орнын басуға әлеуеті бар екенін көрсетеді. Мысалы, 3D басып шығару қолжетімді баспана құрылысын жеделдетуге, қалалық инфрақұрылымды дамытуға және ресурстарды үнемдеуге ықпал ете алады. Дегенмен, технологияның толық әлеуетін ашу үшін техникалық және экономикалық кедергілерді жою, сондай-ақ нормативтік базаны (құрылыс стандарттары мен сертификаттау) бейімдеу қажет.

Қорытындылай келе, зерттеу 3D басып шығару технологиясының құрылыс саласындағы перспективалы бағыт екенін дәлелдеді. Оның артықшылықтары айқын болғанымен, кең таралуы техникалық жетілдірулер мен экономикалық қолжетімділікке байланысты. Бұл технологияны дамыту құрылыс индустриясын

модернизациялаудың және тұрақты дамуға қол жеткізудің маңызды қадамы болмақ. Зерттеу нәтижелері осы бағыттағы болашақ зерттеулер мен практикалық қолданбалар үшін негіз бола алады.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): А.Х. Харисович – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, эксперименттік зерттеулерді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. П.Л. Цыба – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді валидациялау, ғылыми редакциялау, мақаланы рецензиялау және қорытындыларды қалыптастыру. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығы мен тұтастығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді.

Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Smith J., Brown T. 3D Printing in Construction: Opportunities and Challenges // Journal of Construction Engineering. 2023. Vol. 45, No. 3. P. 123–135.
- [2] Қасымов А. Құрылыстағы инновациялық технологиялар. Алматы: ҚазҰТУ баспасы, 2022. 256 б.
- [3] Lee H., Kim S. Additive Manufacturing of Concrete Structures // Building Materials Review. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 89–102.
- [4] Жұмабеков Б. Металл конструкцияларын өндірудің заманауи әдістері // Техникалық ғылымдар журналы. 2024. Т. 18, № 2. Б. 56–67.
- [5] Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.6.

REFERENCES

- [1] J. Smith and T. Brown, "3D Printing in Construction: Opportunities and Challenges," *Journal of Construction Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 123–135, 2023.
- [2] A. Kassymov, *Innovative Technologies in Construction*. Almaty, Kazakhstan: Kazakh National Research Technical University Publishing House, 2022.
- [3] H. Lee and S. Kim, "Additive Manufacturing of Concrete Structures," *Building Materials Review*, vol. 12, no. 4, pp. 89–102, 2021.
- [4] B. Zhumabekov, "Modern Methods of Manufacturing Metal Structures," *Journal of Technical Sciences*, vol. 18, no. 2, pp. 56–67, 2024.
- [5] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172–196, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012