

FTAMP 67.09.33

М.Қ. Сағынтай¹ – негізгі автор, ©
А.А. Адиева², И.Б. Ташмұханбетова³, Д.А. Уксикбаева⁴,
Л.Б. Мақұлбай⁵, А.Қ. Мұстафа⁶, Е.З. Нұғман⁷

 ^{1,6}PhD, ^{2,5}Техн. ғылым, магистрі, ассистент-профессор,
^{3,7}PhD, қауымдас. профессор, ⁴Техн. ғылым, магистрі, оқытушы

ORCID ¹<https://orcid.org/0000-0002-7946-1568> ²<https://orcid.org/0000-0002-8513-8767>
³<https://orcid.org/0000-0002-4066-8238> ⁴<https://orcid.org/0009-0006-3189-933X>
⁵<https://orcid.org/0009-0001-8923-9207> ⁶<https://orcid.org/0000-0002-4751-7141>
⁷<https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>

 ^{1,6,7}Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу
университеті, Алматы қ., Қазақстан
^{1,6,7}«RnD Center» ЖШС
^{2,3,4,5}Халықаралық білім беру корпорациясы, Қазақ бас сәулет-құрылыс
Академиясы, Алматы қ., Қазақстан

@ ³indiraberkinbaykyzy@gmail.com

<https://doi.org/10.55956/GANA2528>

3D БАСПАЛЫҚ БЕТОНДЫ АРМАТУРАЛАУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

Аңдатпа. Құрылыстағы аддитивті технологияның қазіргі кездегі өзекті мәселелерінің бірі – 3D баспаланған бетонды арматуралау болып тұр. Бұл мақалада 3D баспаланған бетонды арматуралау үрдісін автоматтандыруға ерекше назар аудара отырып, арматуралау әдістеріне жан-жақты шолу жасалған. Арматураның әртүрлі түрлерінің функционалдығы қысқаша қарастырылғанымен, оның технологиялық аспектілеріне назар аударылады. Бұл шолу мақаласында негізгі фокус автоматтандыру тұрғысынан қарастырылғандықтан, автоматтандырылуы мүмкін емес кейбір әдістер қарастырылмады. Шолу мақаласында әр әдіс қарастырылған соң оның автоматтандыру мүмкіндігі бағаланып, және оның қасиеттері дәстүрлі темірбетонмен салыстырылды.

Тірек сөздер: аддитивті технология, 3D баспаланған бетон, стандартты болат арматура, 3D баспаланған бетонды арматуралау, арматуралауды автоматтандыру.

 Сағынтай, М.Қ. 3D баспалық бетонды арматуралау әдістеріне шолу [Мәтін] / М.Қ. Сағынтай, А.А. Адиева, И.Б. Ташмұханбетова, Д.А. Уксикбаева, Л.Б. Мақұлбай, А.Қ. Мұстафа, Е.З. Нұғман //Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №3(89). – Б.284-294. <https://doi.org/10.55956/GANA2528>

Кіріспе. Аддитивті технология халық шаруашылығының негізгі салаларының барлығына дерлік қарқынды еніп келе жатыр, сондай салалардың бірі құрылыс саласы. Құрылыстағы аддитивті технология бірнеше бағытта дамып келе жатыр. Олар: құм-қиыршық тасты желіммен байланыстырып қабаттап ғимарат салу [1], қайта өңделген пластик қалдықтарынан үй салу [2-3], металдан құрылыс объектілерін салу [4-6], лай-балшықтан үй салу [7-10], ағаш қалдықтары мен жаңқалардан үй салу [11-13] және цемент пен басқа да байланыстырушы зат негізіндегі бетоннан қабаттап

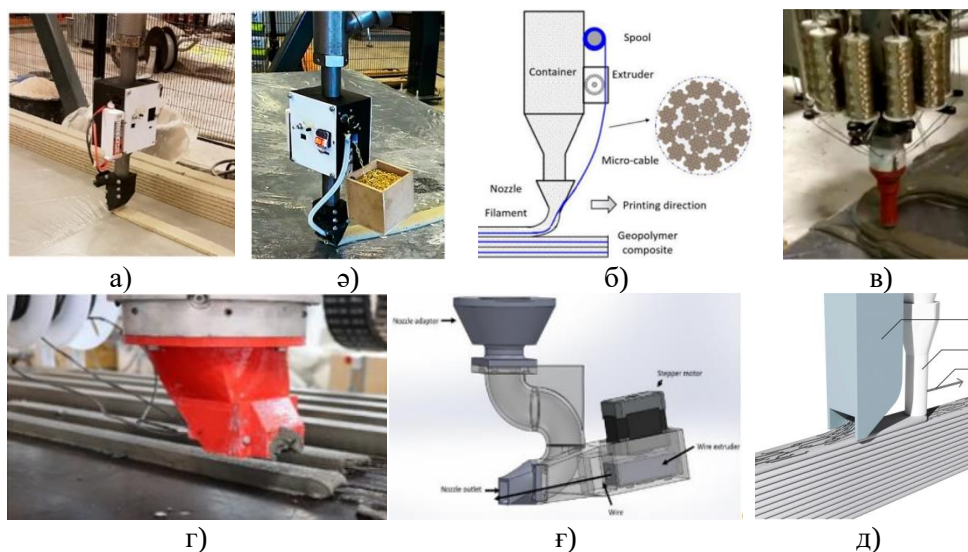
құрылыс объектілерін салу. Бұлардың ішіндегі ең негізгісі және кең зерттеліп те таралып та жатқаны бетоннан қабаттап (бетонды 3d баспалау) құрылыс объектілерін салу. Себебі, қазіргі құрылыс саласында негізгі құрылыс материалы ретінде бетон қолданылады. Демек, дәстүрлі бетонды немесе қасиеттері соған ұқсас немесе балама болатын бетонды аддитивті технологияға бейімдеу оның құрылыс саласына енуін тездетеді.

Бетонды 3d баспалау бойынша көптеген жалпылау шолу мақалалары [14-17] жазылды. Сонымен қатар, бетонның реологиясына [18-20], механикалық қасиеттері мен қабатаралық байланыс және сынақтан өткізуіне [21-25], экономикалық және экологиялығына [26-27] қатысты әртүрлі шолу мақалалары жазылды. 3d баспалық бетонды арматуралау бойынша да бірнеше шолу мақаласы жазылды [28-29]. Дегенмен, бұл шолу мақалалары негізінен арматуралау әдістерін классификациялауға көп көңіл бөлген де, осы салаға құнды мағлұмат болатын практикалық маңыздылығын ескермеген және 3d баспа технологиясы толық автоматтандыруды талап ететіндіктен 3d баспалық бетонды арматуралауды толық аутоматтандыру тұрғысынан қарастырылмаған. Сонымен қатар, дәстүрлі темірбетон жасау технологиясына балама бола алу мүмкіндігі бағаланбаған. Осының орнын толықтыру үшін бұл жұмыста 3d баспалық бетонды арматуралау әдістеріне шолу жасалды.

Ғылыми зерттеулерге шолу және талдау. Аддитивті технологияның дүниеге келуін Чарльз Халлдың 1986 жылы 3D баспа технологиясының алғашқы аппаратын патенттеуімен байланыстырады [30]. Ал, құрылыстағы аддитивті технологияның негізі Behproх Хошневистің Contour Crafting технологиясын ойлап табуымен қаланды деп есептеледі [31]. Дегенмен, құрылыс материалдарын қабаттап құйып отырып, ғимарат салу технологиясы АҚШ-та 20-ғасырдың 30-40 жылдары жүзеге асқаны белгілі [32]. Оған дәлел Е. Уршелдің 1944 жылы алған патенті [33], ол патент алумен тоқталмай өз технологиясын дәлелдеу үшін жұмыртқа тәріздес пішінді үй салған [34], сонымен қатар, оны арматуралауды да ойластырған, әрине, арматура қолмен салынды [35]. Сол заманнан бері аутоматты арматуралау мәселесі өзекті болып келеді.

Бетонды 3D баспалаудағы дәстүрлі емес арматуралармен арматуралау әдістері. *Сымдар мен жіптер, метал талшықтар.* Vos және авторлар [36] 3D баспалалық бетонды арматуралау үрдісін автоматтандыру мақсатында метал сым мен шыншырды арматура ретінде пайдаланды (1а, ә-сурет). Метал сым мен шынжыр жақсы бетонға жақсы интеграцияланып, жасалған үлгіге біршама беріктік берді. Бірақ, суырып тарту сынағында метал сым өзін нашар көрсетті, сонымен қатар төрт нүктелі ию сынағында дәстүрлі темірбетонға жете алмады. Басқа зерттеу топтары арматура ретінде геополимер жіпті [37], бірнеше сымды [38], метал тросты [39] және метал талшықтарын [40] қолданды (1б-д-сурет).

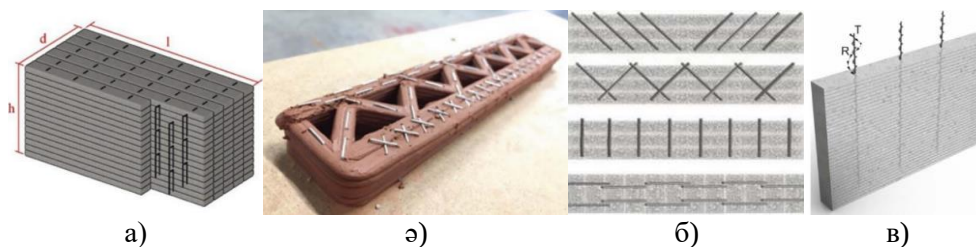
Жоғарыда келтірілген әдістер арматуралау үрдісін автоматтандырғанмен, дәстүрлі темірбетонмен салыстырғанда айтарлықтай беріктік қамтамасыз ете алмады. Сонымен қатар, төрт нүктелі және үш нүктелі ию сынақтарында жеткілікті нәтиже бере алмады. Демек, бұл әдістермен арматураланған 3D баспалалық бетон дәстүрлі темірбетонға балама бола алмайды.



Сурет 1. Бетонды автоматты түрде арматуралау үшін арматура ретінде:
 а – металл сым; б – геополимер сым; в – бірнеше жіп;
 г – минералдар сіңірілген көміртекті талшықты жіп; ф – метал трос және
 д – металл талшықты пайдаланылған.

Енгізу арқылы арматуралау. Ван және авторлар 3D баспаланған бетон қабаттарына U тәріздес сым қадаларды енгізу арқылы арматуралауды ұсынды (2а-сурет) [42]. U-тәріздес сым қадаларды енгізу арқылы арматуралау тәсілін Каталонияның алдыңғы қатарлы сәулет институтының зерттеушілері қабаттар арасына тігінен енгізу арқылы арматуралауды зерттеді (2б-сурет) [43]. Екі жағдайда да баспа бастиектің артында степлер тәрізді құрылғы 3D баспаланған бетонға U тәріздес сым қадаларды автоматты түрде енгізіп отырып арматуралайды.

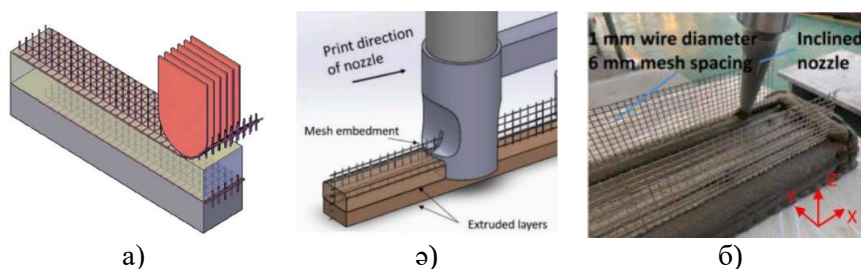
Перрот және авторлар қысқа сым қадаларды 3D баспаланған бетон қабатқа қатысты әртүрлі бұрышпен қадап арматуралауды зерттеді (2б-сурет) [44]. Эйндховен технологиялық университетінің зерттеушілері 3D баспаланған бетон қабатқа бұранда (шруп) бұрап енгізу арқылы арматуралау әдісін ұсынды (2в-сурет) [45]. Бұл әдісте маңызды фактор 3D баспаланған бетон қабаттар төмен жағы қатып қалмауы керек, әйтпесе, не бетон қабат жарылады не шруп кірмей қалады.



Сурет 2. U тәріздес сым қада мен қысқа сым қаданы енгізіп арматуралау:
 а – Ван және авторлардың U тәріздес сым қадамен арматуралау әдісі;
 б – Перрот және авторлар қысқа сым қадалармен арматуралау әдісі; в – бұранда бұрап енгізу арқылы арматуралау әдісі

Енгізу арқылы арматуралау әдістері қабат аралық байланысты жақсартып, толық автоматтандыру мүмкін бергенімен, бұл әдістермен арматураланған 3D баспаланған бетон дәстүрлі бетондағыдай өлшемі ірілеу қиыршық тасты бетонды пайдалануға мүмкіндік бермейді және механикалық қасиеттері дәстүрлі темірбетонға жетпейді, сәйкесінше оған балама бола алмайды.

Тормен арматуралау. Дресден техникалық университетінің зерттеушілері қабатаралық байланысты жақсарту үшін 2,5 тор мата салып арматуралау әдісін ұсынды (3а-сурет) [46]. Бұл әдіс бойынша келесі қабатты басып шығару алдында бірден басылған қабаттарға автоматты түрде 2,5D тор мата салынып отырылады. 2,5D тор мата деп аталу себебі – матаның екі жағынан шығыңқы талшықтар бар. Marchment пен Sanjaayan металл торды тігінен салып қабатаралық байланысты жақсарту әдісін ұсынды (3ә-сурет) [47]. Тордың биіктігі қабатқа қарағанда үлкен, сәйкесінше, ағымдағы қабаттан шығып тұрған бөлігі келесі қабатпен жабылады, сөйтіп, 3D баспа біткенше жалғаса береді. Liu және авторлар металл торды U тәріздес етіп иіп, оны 3D баспаланатын қабатқа салып, оның іші-сыртынан бетон қабатын құйып арматуралау әдісін ұсынды (3б-сурет) [50].



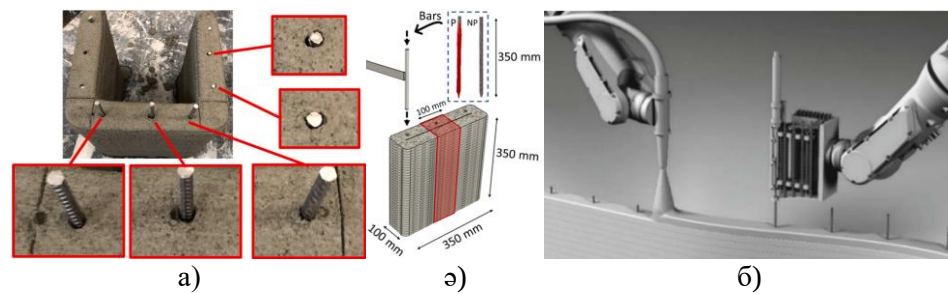
Сурет 3. Тор салып арматуралау: а – 2,5D тор мата салып арматуралау әдісі; ә – метал тор салып арматуралау әдісі; б – U тәріздес метал тормен арматуралау әдісі

Бұл әдістерде арматуралық торлар бетонға жақсы интеграцияланады. Сонымен қатар, арматуралау үрдісін толықтай автоматтандыруға болады. Дегенмен, бұл әдістер тек қабатаралық байланысты жақсартып алады және бетонға айтарлықтай беріктік бере алмайды, яғни, дәстүрлі темірбетонға балам болып қалмайды.

Бетонды 3D баспалағанда стандартты болат арматуралармен арматуралау әдістері. Қада қағу арқылы арматуралау әдістері. Marchment пен Sanjaayan 3D баспалық бетонды стандартты болат арматуралық сырықтардан ұшы үшкір қада жасап, сол қаданы 3D баспаланған бірнеше қабат бетонға қағу арқылы арматуралауды ұсынды (4а-сурет) [48]. Дегенмен, бетон мен арматура арасында саңылау пайда болды, оны жою үшін арматуралық сырықтардан жасалған қаданы алдын-ала сұйық паста тәріздес бетонға малып алып, сосын барып 3D баспаланған бетон қабаттарға енгізуді ұсынды (4ә-сурет) [49]. Freund және авторлар торкөрет бетонды қысқа стандартта болат арматуралық сырықтар қада секілді қадап отырып арматуралауды ұсынды (4б-сурет) [50].

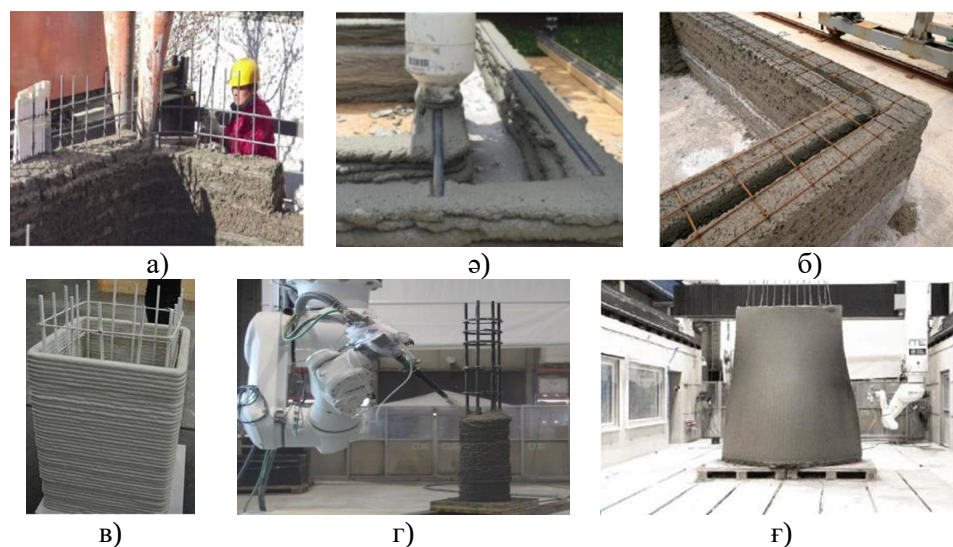
Бұл үш әдіс те толық автоматтандырылу мүмкіндігіне ие. Дегенмен, арматуралау тек бір бағытта, яғни, тік бағытта жүргізіледі. Көлденең бағытта арматуралау қарастырылмаған. Төрт нүктелі ию әдісінде айтарлықтай

беріктік бергенімен, дәстүрлі темір бетонға жетпеді, сәйкесінше, оған балама бола алмайды.



Сурет 4. 3D баспаланған бетон қабаттарға қаданы енгізу арқылы арматуралау: а – стандартты болат арматуралық сырықтардан ұшы үшкір қадамен арматуралау; ә – қаданы алдын ала сұйық паста-бетонға балып алып бетон қабаттарға енгізу арқылы арматуралау; б – торкрет бетонға қысқа қада енгізу арқылы арматуралау

Стандартты болат арматураны қолмен арматуралау. 3D баспаланған бетонды стандартты болат арматура арматуралау оның механикалық қасиеттерін дәстүрлі темірбетонның механикалық қасиеттеріне жақындайтыны зерттеу жұмыстарда [51-53] дәлелденді. Дегенмен, қазіргі уақытта 3D баспаланған бетонды стандартты болат арматурамен арматуралау қолмен жасалады, арматура 3D баспа барысына дейін (5а-сурет), 3D баспа барысында (5ә,б-сурет) [55-56] және басып шығарудан кейін (5в-сурет) салынады [57].

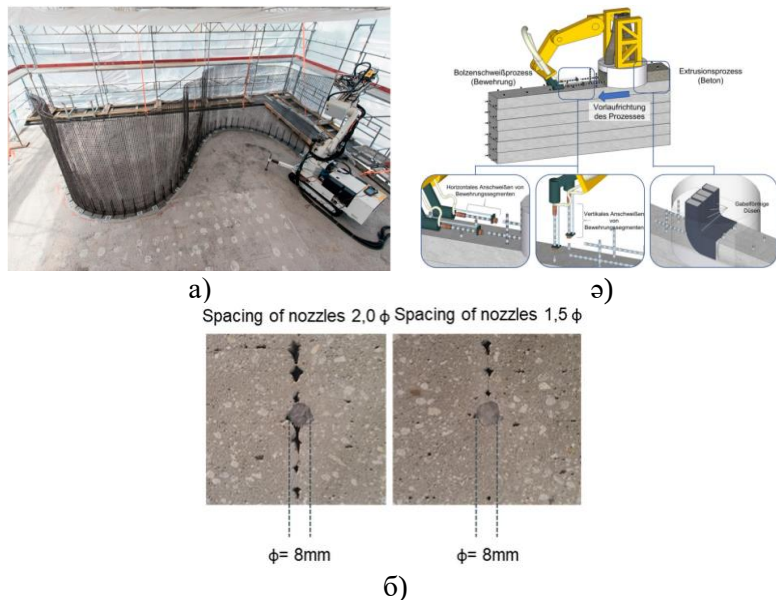


Сурет 5. Стандартты болат арматурамен 3D баспалық бетонды қолмен арматуралау: а – Қытайлық HuaShang Tengda құрылыс компаниясы ұсынған арматуралау әдісі [54]; ә – стандартты болат арматуралық сырықтарды көлденең салып арматуралау [55]; б – арматуралық торды көлденең салып арматуралау [56]; в – 3D баспадан кейін арматуралау [57]; г – торкрет бетонды алдын ала арматуралау [58]; ғ – күрделі пішінді арматуралық тор жасап арматуралау [59]

Kloft және авторлар алдын ала дайындалып орнатылған стандартты арматуралық торды торкрет бетонды қабаттап шашу арқылы колонна салды (5г-сурет) [58]. Наск және авторлар осыған ұқсас әдісті пайдаланып, күрделі пішінді архитектуралық объект салды (5г-сурет) [58]

5ә,б-суреттегі арматуралау әдісін көптеген коммерциялық компаниялар қолданады, мысалға, TotalKustom [60] және ApisCor [61] сияқты компаниялардың құрылыс тәжірибесінде әлі қолданыста. Бұл қабаттап салынатын құрылысты арматуралау деңгейі өткен ғасырдың 40-50 жылдарғы дәрежесінде [35] қалып кеткенін көрсетеді. Яғни 3D баспалық бетонды арматуралау үрдісін автоматтандыру өте өзекті мәселе болып тұр.

Стандартты болат арматурамен 3D баспалық бетонды арматуралауды автоматтандыру әдістері. Цюрих техникалық университетінің зерттеу тобы стандартты болат арматурадан автоматты режимде арматуралық торды құру мәселесін шеше алды (6а-сурет) [62]. Дегенмен, бетон қолмен құйылды. Ахен техникалық университетінің зерттеу тобы 3D баспа барысында стандартты болат арматурамен 3D баспаланған бетонды автоматты түрде арматуралау тұжырымдамаларын ұсынды (6ә-сурет) [63]. Тұжырымдамаға сәйкес, қысқа арматуралық жолақтар тігінен және көлденеңінен орналастырылады, оларды ұзарту үшін доғалық дәнекерлеу қолданылады. Дегенмен, бұл тұжырымдаманың кемшіліктері де бар: біріншіден, тік және көлденең арматура бір-бірімен байланысты емес; екіншіден, арматураны бетонға біріктіру мәселесі әлі шешілген жоқ (6б-сурет); үшіншіден, тұжырымдаманы дәлелдеу үшін арматураны күшейту және дәнекерлеу тұжырымдамада көрсетілгендей автоматты түрде емес, қолмен жасалды.



Сурет 6. 3D баспалық бетонды арматуралауды автоматтандыру әдістері:
а – Mesh Mould автоматты арматуралау әдісі; ә – Ахен техникалық университетінің зерттеушілері ұсынған автоматты арматуралау әдісі;
б – арматуралық тордың бетонға нашар интеграциялануы

Mesh Mould әдісі бастапқыдан 3D баспаға арналмаған еді. Сонда да 3D баспаланған бетонды арматуралаумен айналысатын зерттеушілер бұл әдісті 3D баспаланған бетонды арматуралауға бейімдеуге болады деп сенеді [29]. Егер бұл әдісті 3D баспаланған бетонды арматуралауға бейімдей алса, онда оның қасиеттері дәстүрлі бетонға жақындауы әбден мүмкін. Ахен техникалық университетінің зерттеу тобы ұсынған тұжырымдама толық іске асса және олар арматураны бетонға интеграциялау мәселесін шеше алса, онда 3D баспаланған бетонды арматуралау мәселесін шешуде технологиялық серпіліс берер еді. Және бұл әдіспен арматураланған бетонның қасиеттері дәстүрлі бетонға жақын не бірдей болуы ібден мүмкін.

Қорытынды. 3D баспаланған бетонды арматуралау – құрылыстағы аддитивті технологияның қазіргі кездегі өзекті мәселелерінің бірі болып тұр. Бұл мақалада 3D баспаланған бетонды арматуралау әдістеріне жан-жақты шолу жасалды. Арматураның әртүрлі түрлерінің функционалдығы қысқаша қарастырылды. Мақалада негізінен 3D баспаланған бетонды арматуралау үрдісін автоматтандыру тұрғысынан қарастырылды.

Металл сым, шынжыр, трос және талшықтар, сонымен қатар, U тәріздес сым қада мен қысқа сым қадалар тек қабатаралық байланысты жақсартуға ғана мүмкіндік береді. Бұл әдістер мұндай арматуралар қолданылмаған бетонға қарағанда біршама беріктік бергенімен, дәстүрлі темірбетонға балама бола алмайды. Ал, әр түрлі торлар мен қадалар бетонның бір бағыттағы беріктігін арттырғанымен, бәрібір дәстүрлі бетонмен салыстыруға келмейді. Демек, бұл әдістер автоматтандыру тұрғысынан жақсы болғанымен, практикалық қолданысқа ену потенциалы өте төмен.

Стандартты болат арматураны пайдаланып автоматты түрде арматуралық тор құратын әдістердің қазіргі кездегі кемшіліктерін жою арқылы бетонды 3D баспалау технологиясын дәстүрлі темірбетон технологиясы деңгейіне дейін көтеру перспективасы бар. Сондықтан, осы салаға келген зерттеушілер осы бағытта зерттеу жұмыстарын жүргізгені абзал.

Әдебиеттер тізімі

1. D-Shape [Electronic resource]. – Access mode: <https://d-shape.com/>. Date of access: 21.12.2024.
2. Housing crisis + plastic overflow = prefab made of used bottles [Electronic resource]. – Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=t7KbfPSDdmc&ab_channel=KirstenDirksen. Date of access: 21.12.2024.
3. Singularityhub [Electronic resource]. – Access mode: <https://singularityhub.com/2022/11/04/these-sleek-houses-are-3d-printed-from-recycled-plastic-prices-start-at-26900/>. Date of access: 21.12.2024.
4. Kanyilmaz A., Demir A.G., Chierici M., Berto F., Gardner L., Kandukuri S.Y., Kassabian P., Kinoshita T., Laurenti A., Paoletti I., du Plessis A., Razavi N. Role of metal 3D printing to increase quality and resource-efficiency in the construction sector // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 50. – P. 102541.
5. Buchanan C., Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 180. – P. 332-348.
6. MX3D Bridge [Electronic resource]. – Access mode: <https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/>. Date of access: 21.12.2024.
7. Eco-sustainable 3D printed house – Tecla [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=w9sXqxccRPM>. Date of access: 21.12.2024.

8. 3D Printing Architecture [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/>. Date of access: 21.12.2024.
9. Ji Y., Poullain P., Leklou N. The selection and design of earthen materials for 3D printing // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 404.
10. Faleschini F., Trento D., Masoomi M., Pellegrino C., Zanini M.A. Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 398.
11. PrinTimber: Affordable Housing Using 3D Printed Construction Materials from Waste Wood [Electronic resource]. – Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=54eIyNtNz1k&ab_channel=UniversityofIdaho. Date of access: 21.12.2024.
12. BioHome3D [Electronic resource]. – Access mode: <https://composites.umaine.edu/biohome3d/>. Date of access: 21.12.2024.
13. Building with less Waste: Recyclable 3D Printed Formwork from Wood Waste [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.3printr.com/building-with-less-waste-recyclable-3d-printed-formwork-from-wood-waste-0064364/>. Date of access: 21.12.2024.
14. De Schutter G., Lesage K., Mechtcherine V., Nerella V.N., Habert G., Agusti-Juan I. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 25-36.
15. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112. – P. 37-49.
16. Zhang J., Wang J., Dong S., Yu X., Han B. A review of the current progress and application of 3D printed concrete // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105533.
17. Lu B., Weng Y., Li M., Qian Y., Leong K.F., Tan M.J., Qian S.A systematical review of 3D printable cementitious materials // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 207. – P. 477-490.
18. Paritala S., Singaram K.K., Bathina I., Khan M.A., Jyosyula S.K.R. Rheology and pumpability of mix suitable for extrusion-based concrete 3D printing: A review // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 402.
19. Wang C., Chen B., Vo T.L., Rezanian M. Mechanical anisotropy, rheology and carbon footprint of 3D printable concrete: A review // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 76.
20. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, Recent Advancements, and Future Perspectives // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 392.
21. Liu K., Takasu K., Jiang J., Zu K., Gao W. Mechanical properties of 3D printed concrete components // *Developments in the Built Environment*. – 2023. – Vol. 16.
22. Warsi S.B.F., Panda B., Biswas P. Exploring fibre addition methods and mechanical properties of fibre-reinforced 3D printed concrete // *Developments in the Built Environment*. – 2023. – Vol. 16.
23. Nodehi M., Aguayo F., Nodehi S.E., Gholampour A., Ozbakkaloglu T., Gencel O. Durability properties of 3D printed concrete (3DPC) // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 142.
24. Kaliyavaradhan S.K., Ambily P.S., Prem P.R., Ghodke S.B. Test methods for 3D printable concrete // *Automation in Construction*. – 2022. – Vol. 142.
25. Ding T., Xiao J., Mechtcherine V. Microstructure and mechanical properties of interlayer regions in extrusion-based 3D printed concrete // *Cement and Concrete Composites*. – 2023. – Vol. 141.
26. Ahmed G.H. A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 66.
27. Motalebi A., Khondoker M.A.H., Kabir G. A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing // *Sustainable Operations and Computers*. – 2024. – Vol. 5. – P. 41-50.

28. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E., Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing // *Civil Engineering Design*. – 2020. – Vol. 2. – P. 131-139.
29. Mechtcherine V., Buswell R., Kloft H., Bos F.P., Hack N., Wolfs R., Sanjayan J., Nematollahi B., Ivaniuk E., Neef T. Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework // *Cement and Concrete Composites*. – 2021. – Vol. 119.
30. Savvides L.A History of 3D Printing: Three Waves of Development // *3D Printing Cultures, Politics and Hackerspaces (Digital Activism and Society: Politics, Economy And Culture In Network Communication)*. – Leeds: Emerald Publishing Limited, 2021. – P. 29-51.
31. Smith D. Printed buildings: an international race for the ultimate in automation // *Construction Research and Innovation*. – 2012. – Vol. 3, No. 2. – P. 26-31.
32. The Real First 3D Printed Building (1930's) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=Dl9rhG5BPrM&t=257s>. Date of access: 21.12.2024.
33. Urschel, W. E. Machine for building walls. U.S. Patent No. 2,339,892, January 25, 1944. – Washington, DC: United States Patent Office.
34. Concrete Without Forms [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=nkxe9uK8jSo>. Date of access: 21.12.2024.
35. Urschel Wall Building Machine [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=QXqwnJTVSsE>. Date of access: 21.12.2024.
36. Bos Z.Y., Ahmed E.R., Jutinov T.A.M., Salet T.A.M. Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete // *Materials*. – 2017. – Vol. 10.
37. Ma G., Li Z., Wang L., Bai G. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing // *Materials Letters*. – 2019. – Vol. 235. – P. 144-147.
38. Caron J.F., Demont L., Ducoulombier N., Mesnil R. 3D printing of mortar with continuous fibres: Principle, properties and potential for application // *Automation in Construction*. – 2021. – Vol. 129. – P. 103806.
39. Neef T., Müller S., Mechtcherine V. 3D-Druck mit Carbonbeton: Technologie und die ersten Untersuchungsergebnisse // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2020. – Vol. 115. – No. 12. – P. 943-951.
40. Lim J.H., Panda B., Pham Q.C. Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 178. – P. 32-41.
41. Gebhard L., Mata Falcón J., Anton A., Dillenburger B., Kaufmann W. Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies // *Engineering Structures*. – 2018. – Vol. 240.
42. Wang L., Ma G., Liu T., Buswell R., Li Z. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails // *Cement and Concrete Research*. – 2021. – Vol. 148. – P. 106535.
43. Geneidy O., Kumarji S., Dubor A., Sollazzo A. Simultaneous Reinforcement of Concrete while 3D Printing // *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. – 2020. – P. 895-905.
44. Perrot A., Jacquet Y., Rangeard D., Courteille E., Sonebi M. Nailing of layers: A promising way to reinforce concrete 3D printing structures // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – No. 7. – P. 1518.
45. Hass L., Bos F. Bending and pull-out tests on a novel screw type reinforcement for extrusion-based 3D printed concrete // *RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. – 2020. – P. 632-645.
46. Mechtcherine V., Nerella V. N. Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton // *Beton- und Stahlbetonbau*. – 2018. – Vol. 113. – P. 496-504.
47. Marchment T., Sanjayan J. Mesh reinforcing method for 3D concrete printing // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 109. – P. 102992.
48. Marchment T., Sanjayan J. Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 120. – P. 103394.

49. Marchment T., Sanjayan J. Reinforcement method for 3D concrete printing using paste-coated bar penetrations // Automation in Construction. – 2021. – Vol. 127. – P. 103694.
50. Liu M., Wang L., Ma G., Li W., Zhou Y. U-type steel wire mesh for the flexural performance enhancement of 3D printed concrete: A novel reinforcing approach // Materials Letters. – 2023. – Vol. 331.
51. Ding T., Qin F., Xiao J., Chen X., Zuo Z. Experimental study on the bond behaviour between steel bars and 3D printed concrete // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 49.
52. Wang Z., Jia L., Deng Z., Zhang C., Zhang Z., Chen C., Pan J., Zhang Y. Bond behavior between steel bars and 3D printed concrete: Effect of concrete rheological property, steel bar diameter and paste coating // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 349.
53. Aramburu A., Calderon-Uriszar-Aldaca I., Puente I. Bonding strength of steel rebars perpendicular to the hardened 3D-printed concrete layers // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 340.
54. Scott, C. Chinese construction company 3D prints an entire two-story house on-site in 45 days. – 2016. – Vol. 2 [Electronic resource]. – Access mode: <https://3dprint.com/138664/huashangtengda-3d-print-house/>. Date of access: 21.12.2024.
55. Doris, V. V2 Vesta Beton-3D-Drucker baut kleines Haus. – 2016 [Electronic resource]. – Access mode: <https://3druck.com/drucker-und-produkte/v2-vesta-beton-3d-drucker-baut-kleines-haus-2846225/>. Date of access: 21.12.2024.
56. Xiao J., Ji G., Zhang Y., Ma G., Mechtcherine V., Pan J., Wang L., Ding T., Duan Z., Du S. Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities // Cement and Concrete Composites. – 2021. – P. 104115.
57. Winsun. 3D printing creates better buildings. – 2014 [Electronic resource]. – Access mode: http://www.winsun3d.com/News/news_inner/id/389. Date of access: 21.12.2024.
58. Kloft H., Empelmann M., Hack N., Herrmann E., Lowke D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing // Civil Engineering Design. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – P. 131-139.
59. Hack, N., Kloft, H. Shotcrete 3D printing technology for the fabrication of slender fully reinforced freeform concrete elements with high surface quality: a real-scale demonstrator // RILEM Bookseries. – Springer, 2020. – P. 1128-1137.
60. Alec. Lewis Grand Hotel teams with Andrey Rudenko to develop world's first 3D printed hotel, planning 3D printed homes. – 2015 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.3ders.org/articles/20150909-lewis-grand-hotel-andrey-rudenko-to-develop-worlds-first-3d-printed-hotel.html>. Date of access: 21.12.2024.
61. Murphy, M. Apis Cor can 3D-print an entire house in just one day. – 2017 [Electronic resource]. – Access mode: <https://qz.com/924909/apis-cor-can-3d-print-and-entire-house-in-just-one-d>. Date of access: 21.12.2024.
62. Hack N., Dorfler K., Walzer A.N., Wangler T., Mata-Falcon J., Kumar N., Buchli J., Kaufmann W., Flatt R.J., Gramazio F., Kohler M. Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of non-standard concrete structures: a real scale architectural demonstrator // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 111. – P. 103197.
63. Classen M., Ungermann J., Sharma R. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete // Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10(11). – P. 3791.

Зерттеу жұмыстары ҚР ҒЖБМ Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылған АР19178044 «Әскери мақсаттағы құрылыс объектілерін салуға арналған құрылыс 3D принтерінің баспа бастиегін жобалау және әзірлеу» жоба аясында орындалды.

Материал редакцияға 14.04.25 түсті, 25.09.25 қабылданды.

М.Қ. Сағынтай^{1,2}, А.А. Адиева³, И.Б. Ташмуханбетова³,
Д.А. Уксикбаева³, Л.Б. Макулбай³, А.Қ. Мұстафа^{1,2}, Е.З. Нұғман^{1,2}

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им.

К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²ТОО «RnD Center», г. Алматы, Казахстан

³Международная образовательная корпорация, Казахская головная архитектурно-
строительная академия, г. Алматы, Казахстан

ОБЗОР МЕТОДОВ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНА 3D-ПЕЧАТЬЮ

Аннотация. Одной из актуальных проблем аддитивной технологии в строительстве на сегодняшний день является армирование бетона 3D-печатью. В этой статье представлен всесторонний обзор методов армирования с особым упором на автоматизацию процесса армирования бетона 3D-печатью. Хотя функциональность различных типов арматуры кратко рассматривается, основное внимание уделяется ее технологическим аспектам. Поскольку в этой обзорной статье основное внимание уделялось автоматизации, некоторые методы, которые не могут быть автоматизированы, не рассматривались. После рассмотрения каждого метода в обзорной статье оценивалась его способность к автоматизации, а его свойства сравнивались с традиционными железобетонами.

Ключевые слова: аддитивная технология, бетон с 3D-печатью, стандартная стальная арматура, армирование бетона с 3D-печатью, автоматизация армирования.

M.K. Sagyntay^{1,2}, A.A. Adieva³, I.B. Tashmukanbetova³,
D.A. Uksikbaeva³, L.B. Makulbai³, A.K. Mustafa^{1,2}, Y.Z. Nugman^{1,2}

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²LLP "RnD Center", Almaty, Kazakhstan

³International Educational Corporation, Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil
Engineering, Almaty, Kazakhstan

OVERVIEW OF 3D-PRINTED CONCRETE REINFORCEMENT METHODS

Abstract. One of the urgent problems of additive technology in construction today is the reinforcement of concrete by 3D printing. This article provides a comprehensive overview of reinforcement methods, with a particular focus on automating the 3D-printed concrete reinforcement process. Although the functionality of various types of fittings is briefly discussed, the main focus is on its technological aspects. Since this review article focused on automation, some methods that cannot be automated were not considered. After reviewing each method, the review article evaluated its ability to automate, and its properties were compared with traditional reinforced concrete.

Keywords: additive technology, 3D-printed concrete, standard steel reinforcement, 3D-printed concrete reinforcement, reinforcement automation.