

А.О. АДАМЦЕВИЧ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, директор (AdamtsevichAO@mgsu.ru),
А.П. ПУСТОВГАР, канд. техн. наук, доцент, научный руководитель (PustovgarAP@mgsu.ru),
Л.А. АДАМЦЕВИЧ, канд. техн. наук, зав. НИЛ ЭЭиУС (AdamtsevichLA@mgsu.ru),
Д.В. КРАМЕРОВ, зав. НИЛ СКРИБ (KramerovDV@mgsu.ru),
П.Ю. ВОРОБЬЕВ, младший научный сотрудник НИЛ ЭЭиУС (VorobevPYU@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
НИИ строительных материалов и технологий (129337, Москва, Ярославское ш., 26)

Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства

Рассматривается наиболее распространенный на сегодняшний день подход к применению технологии аддитивного строительного производства, предусматривающий печать контура зданий и сооружений с созданием несъемной бетонной опалубки для возведения несущих и ограждающих конструкций. Исследуются особенности работы несъемной опалубки под действием бокового давления бетонной смеси. Приводятся результаты реализованного на базе НИИ СМиТ НИУ МГСУ этапа экспериментальных исследований, в рамках которого изучались прочностные характеристики образцов, отобранных из однослойных бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, а также несущая способность фрагментов несъемной опалубки прямоугольной и замкнутой цилиндрической формы под воздействием моделируемого давления подвижной бетонной смеси. В ходе работы изучено влияние на прочность и несущую способность формообразующих элементов несъемной опалубки таких параметров, как ширина и высота печатного слоя, а также наличие холодных швов между отдельными слоями напечатанной конструкции. Выполнение работы направлено на ускорение внедрения передовых технологий в строительстве в части создания научно-технического задела для развития аддитивного строительного производства и развития отечественной нормативно-технической базы в области строительной 3D-печати.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство; 3D-печать бетоном, 3DCP, надежность, гидростатическое давление, анизотропия свойств, прочность межслоевого сцепления, параметры печати.

Работа выполнена в рамках государственного задания, утвержденного Минстроем России от 29 декабря 2022 г. № 069-00003-23-00 на 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 гг.

Для цитирования: Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Крамеров Д.В., Воробьев П.Ю. Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46>

A.O. ADAMTSEVICH, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Director (AdamtsevichAO@mgsu.ru),
A.P. PUSTOVGAR, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Scientific Director (PustovgarAP@mgsu.ru),
L.A. ADAMTSEVICH, Candidate of Sciences (Engineering), Head of Research Laboratory of Energy Efficiency, Ecology and Sustainable Construction (AdamtsevichLA@mgsu.ru),
D.V. KRAMEROV, Head of Research Laboratory of Building Composites, Mortars and Concrete, (KramerovDV@mgsu.ru),
P.Yu. VOROBEV, Junior Researcher, Research Laboratory of Energy Efficiency, Ecology and Sustainable Construction (VorobevPYU@mgsu.ru)
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Research Institute of Construction Materials and Technologies
(26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Investigation of the Working Features of Concrete Structures Manufactured Using Technologies of Additive Building Manufacturing

The most common approach to the application of additive manufacturing technology today, which provides for printing the contour of buildings and structures with the creation of non-removable concrete formwork for the construction of load-bearing and enclosing structures. The features of the operation of a non-removable formwork under the action of lateral pressure of a concrete mixture are investigated. The results of the experimental research stage implemented on the basis of the SMITH Research Institute of the Moscow State University of Civil Engineering are presented, in which the strength characteristics of samples selected from single-layer concrete structures made using additive manufacturing technology, as well as the bearing capacity of fragments of non-removable formwork of rectangular and closed cylindrical shape under the influence of simulated pressure of a concrete mixture were studied. In the course of the work, the influence of parameters such as the width and height of the printed layer, as well as the presence of cold seams between individual layers of the printed structure on the strength and bearing capacity of the forming elements of the permanent formwork was studied. The work execution is aimed at accelerating the introduction of advanced technologies in construction in terms of creating scientific and technical groundwork for the development of additive construction production and the development of the domestic regulatory and technical base in the field of construction 3D printing.

Keywords: additive construction production; 3D printing with concrete, 3 DCP, reliability, hydrostatic pressure, anisotropy of properties, interlayer bonding strength, printing parameters.

The work was carried out within the framework of the state task approved by the Ministry of Construction of the Russian Federation dated December 29, 2022 No. 069-00003-23-00 for 2023 and for the planning period 2024 and 2025.

For citation: Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P., Adamtsevich L.A., Kramerov D.V., Vorobev P.Yu. Investigation of the working features of concrete structures manufactured using technologies of additive building manufacturing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 38–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46>

Аддитивное строительное производство (строительная 3D-печать бетоном, технология 3DCP – в международной терминологии) является перспективным способом автоматизированного возведения зданий и сооружений из бетона, который призван сократить долю ручного труда на строительной площадке, ускорить производство строительно-монтажных работ и обеспечить сокращение материалоемкости строительства [1–9].

Наиболее распространенным на сегодняшний день подходом применения аддитивных технологий в строительстве является печать несъемной бетонной опалубки для вертикальных несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, которые затем заполняются подвижной бетонной смесью требуемой плотности либо сыпучими наполнителями, выполняющими функцию теплоизоляции [10, 11].

Возведение несъемной опалубки при помощи строительного 3D-принтера позволяет исключить расходы на инвентарную опалубку и производственные процессы ее ручного монтажа и демонтажа, а также сократить объем отходов строительного производства, создаваемых на этапе производства опалубочных работ. Использование несъемной опалубки, изготовленной по технологии аддитивного строительного производства, позволяет создавать конструкции сложной архитектурной формы и придавать уникальный архитектурный облик возводимым зданиям и сооружениям, что в отличие от традиционных способов бетонирования с применением инвентарной опалубки не приводит к удорожанию строительства. Кроме этого, отказ от печати полнотелых бетонных конструкций в пользу применения строительной 3D-печати для возведения лишь внешнего контура строительных конструкций обеспечивает дополнительный экономический эффект благодаря оптимизации затрат на строительные материалы, так как при таком подходе более дорогие модифицированные строительные смеси для аддитивного строительного производства составляют лишь небольшую долю объема возводимой конструкции, которая может в дальнейшем заполняться более дешевыми строительными материалами.

При этом одной из проблем перехода к массовому практическому использованию технологии аддитивного производства остается недостаточная изученность особенностей работы тонкостенных бетонных конструкций, изготовленных методом послойной экструзии, под действием различных видов нагрузок, включая гидростатическое давление бетонной смеси, что затрудняет проектирование и расчет несъемной опалубки, выполненной по технологии аддитивного строительного производства.

Для преодоления указанного барьера на базе НИИ СМиТ НИУ МГСУ проводятся экспериментальные исследования, обеспечивающие сбор, накопление и анализ эмпирических данных об особенностях прочностных свойств и несущей способности

элементов несъемной опалубки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, а также изучение и систематизацию факторов, оказывающих влияние на конечные эксплуатационные свойства таких конструкций.

Материалы и методы

С учетом технологических особенностей производства опалубочных конструкций из бетона методом аддитивного строительного производства основными областями применения таких решений является опалубка стен, а также опалубка колонн и пилонов. Технология изготовления указанных элементов предполагает, как правило, вертикальную ориентацию (плоскость укладки слоев печати параллельна основанию).

При использовании напечатанной на строительном 3D-принтере бетонной опалубки ее несущая способность обеспечивается:

- физико-механическими характеристиками материала для аддитивного строительного производства, из которого изготавливается конструкция;
- герметичностью формообразующих поверхностей, а также прочностью, жесткостью и геометрической неизменяемостью формы и размеров опалубочной конструкции при воздействии давления бетонной смеси в процессе бетонирования.

С учетом анализа распространенных форм вертикальных элементов и характера работы печатных элементов в конструкции опалубки в рамках проводимого исследования были выбраны элементы двух основных разновидностей: прямолинейная стенка и элемент колодца цилиндрической формы (рис. 1).

В общем случае при укладке бетонной смеси в опалубку на ее формообразующие элементы воздействует давление с эпюрой треугольного вида. Однако в рамках проводимого исследования в целях уменьшения высоты испытываемых образцов к поверхности бетонной смеси прикладывалась дополнительная равномерно распределенная нагрузка, которая увеличивалась с постоянной скоростью до момента

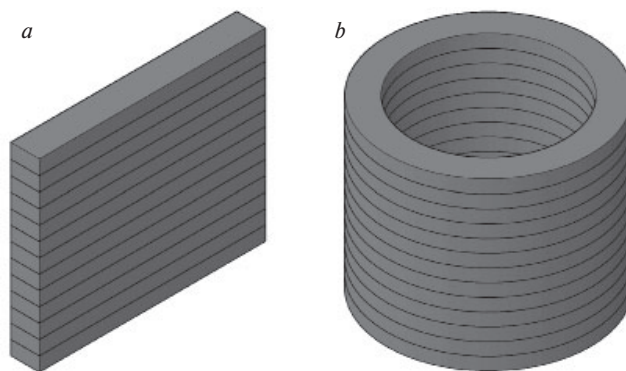


Рис. 1. Схематичные изображения исследуемых элементов: прямолинейная стенка габаритами 500×300 мм (а) и колодец цилиндрической формы (б) с высотой и внутренним диаметром 300 мм

Fig. 1. Schematic images of the elements under study: a straight wall with dimensions of 500×300 mm (a) and a cylindrical well with a height and internal diameter of 300 mm

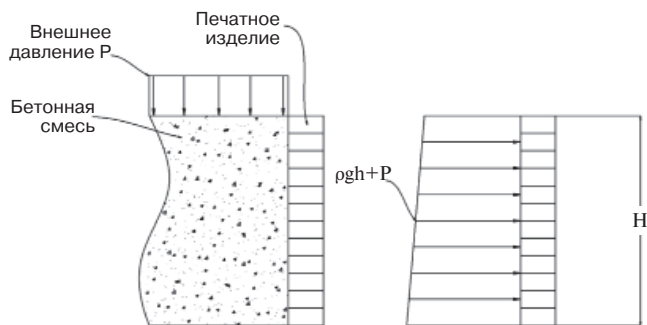


Рис. 2. Схема работы формообразующего элемента несъемной опалубки под воздействием бокового давления и дополнительной нагрузки (слева) и эпюра нагрузки по высоте конструкции (справа): ρ – плотность бетонной смеси; g – ускорение свободного падения; h – переменная высота; H – полная высота заливки смеси; P – внешнее (дополнительное) давление на поверхность смеси

Fig. 2. Scheme of operation of the formative element of permanent formwork under the influence of pressure and additional load (left) and diagram of the load along the height of the structure (right): ρ – density of the concrete mixture; g – acceleration of free fall; h – variable height; H – total pouring height concrete mixture; P – external (additional) pressure on the surface of the mixture

потери опалубкой герметичности и/или несущей способности. Таким образом моделировалось увеличение давления столба бетонной смеси на формообразующий элемент опалубки в нижней зоне треугольной эпюры давления при увеличении высоты бетонирования, а эпюра бокового давления из треугольной принимала форму трапеции, близкой к прямоугольнику (рис. 2).

Для определения несущей способности формообразующих элементов несъемной опалубки в виде фрагментов прямолинейных конструкций была изготовлена оснастка, позволяющая испытывать формообразующие элементы длиной до 500 мм и высотой до 300 мм.

Перечень характеристик и параметров, определяемых в рамках настоящего исследования:

- плотность;
- прочность при сжатии и растяжение при изгибе контрольных образцов материала, изготовленных методом формования, и образцов, отобранных из напечатанных конструкций;
- несущая способность и герметичность формообразующих элементов под воздействием моделируемого давления бетонной смеси.

Изготовление образцов-фрагментов несъемной бетонной опалубки с применением технологии аддитивного строительного производства осуществлялось при помощи портального строительного 3D-принтера «АМТ» S-6045M, имеющего зону печати 3500×3100×1000 мм. Экструзия материала в процессе печати всех изделий выполнялась при помощи штатной печатающей головки строительного 3D-принтера со шнековой подачей из накопительного бункера.

Подготовка образцов и проведение испытаний

Для определения прочности при сжатии и на растяжение при изгибе методом аддитивного строительного производства изготавливались изделия в

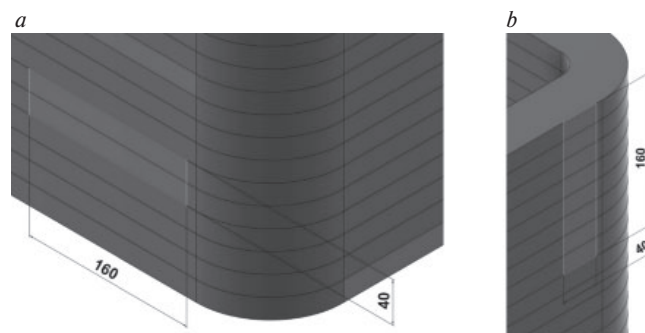


Рис. 3. Схемы выпиливания образцов: вдоль направления печати (а) и перпендикулярно направлению печати (b)

Fig. 3. Sample cutting patterns: along the printing direction (a) and perpendicular to the printing direction (b)

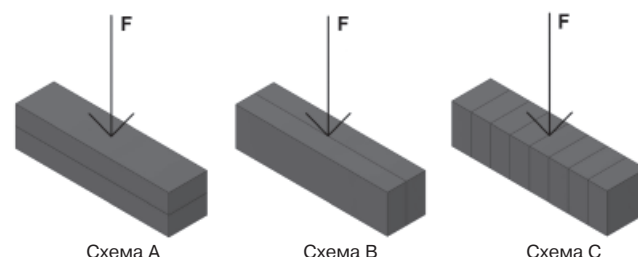


Рис. 4. Направления приложения нагрузки при определении прочности при сжатии и растяжении при изгибе: сверху – схема А, вдоль – схема В и поперек – схема С печатного слоя

Fig. 4. Directions of load application when determining compressive and tensile strength in bending: from above – Scheme A, along – Scheme B, and across – Scheme C, printed layer



Рис. 5. Изделия в форме колодцев с высотой печатного слоя 1 см (2 шт.) и высотой печатного слоя 2 см (2 шт.), изготовленные для выпиливания образцов 160×40×40 мм

Fig. 5. Well-shaped products with a printed layer height of 1 cm (2 pcs.) and a printed layer height of 2 cm (2 pcs.), made for cutting samples 160×40×40 mm

форме колодца квадратной формы с шириной печатного слоя 5 см, из которых затем при помощи камнерезного станка выпиливались образцы-призмы размером примерно 160×40×40 мм. Образцы выпиливались в двух различных направлениях: горизонтальном (вдоль направления печати) и вертикальном (перпендикулярно направлению печати) (рис. 3). Выпиленные образцы дополнительно шлифовались в целях приближения к заданным размерам и обеспечения плоскопараллельности опорных граней в процессе проведения испытаний на сжатие.

Горизонтальных образцов было выпилено в два раза больше, чем вертикальных, в целях получения в

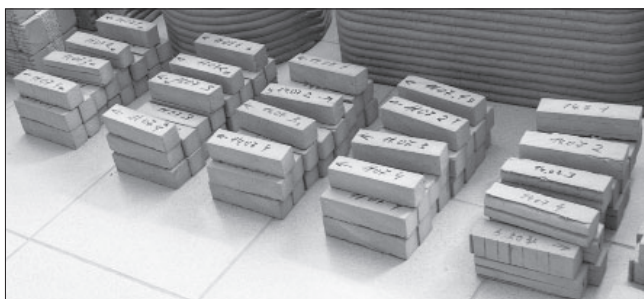


Рис. 6. Образцы размером 160×40×40 мм, выпиленные из напечатанных изделий

Fig. 6. Samples measuring 160×40×40 mm, cut from printed products



Рис. 7. Изделие для выпиливания образцов прямоугольных стенок в форме квадратного колодца с высотой печатного слоя 2 см, изготовленное в процессе непрерывной печати (слева), и первая треть аналогичного изделия с имитацией «холодного» шва (справа)

Fig. 7. A product for cutting samples of rectangular walls in the shape of a square well with a printed layer height of 2 cm, manufactured in a continuous printing process (left) and the first third of a similar product with an imitation of a "cold" seam (right)

общей сложности трех различных серий образцов для проведения испытаний с приложением нагрузки в трех различных направлениях: сверху, вдоль и поперек печатного слоя (рис. 4). Кроме того, все образцы для данного вида испытаний были изготовлены двумя способами: при высоте печатного слоя 1 и 2 см.

На рис. 5 представлены фактически изготовленные изделия в форме колодцев для выпиливания образцов, необходимых для определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе (рис. 6). Для проведения испытаний отбирались только те образцы, на которых не наблюдалось визуальных дефектов после выпиливания.

Для определения прочности (несущей способности) единичного прямоугольного формообразующего элемента под воздействием бокового давления бетонной смеси изготавливались колодцы квадратной формы, из которых затем выпиливалась одна серия из четырех прямоугольных образцов-стенок. Изделия печатались также двух видов: с высотой слоя 1 и 2 см. Часть колодцев при этом изготавливалась с имитацией холодного шва: в этом случае выполнялась печать до одной трети общей высоты изделия, после чего делалась пауза в процессе печати не менее чем на 6 ч (рис. 7). Перед возобновлением печати контактная поверхность ранее напечатанной части изделия смачивалась водой при помощи ручного распылителя.

Для определения прочности опалубки замкнутой цилиндрической формы были напечатаны две серии образцов-цилиндров высотой 30 см (рис. 8). Одна



Рис. 8. Процесс изготовления серии из четырех образцов опалубки замкнутой цилиндрической формы

Fig. 8. The process of manufacturing a series of four samples of closed cylindrical formwork

серия была изготовлена с применением того же сопла экструдера, который применялся для печати всех прочих изделий, изготавливаемых в рамках проводимого исследования. Вторая серия была изготовлена с применением сопла уменьшенного диаметра, в результате чего толщина печатного слоя была снижена с 5 до 3,5 см.

Испытание фрагментов конструктивных элементов несъемной опалубки под действием гидростатического давления проводилось с использованием подвижной бетонной смеси (марка по подвижности П4) с высоким содержанием в составе добавки-замедлителя в целях исключения возможной потери подвижности и/или начала схватывания в процессе проведения испытания.

Подготовка к проведению испытания (рис. 9) для образцов единичных фрагментов прямолинейных стенок включала следующие этапы:

- подготовка оснастки и ее размещение в рабочей зоне испытательного пресса;
- установка в оснастку испытуемого образца фрагмента прямолинейной стенки и заполнение внутреннего пространства оснастки рабочим телом — подвижной бетонной смесью;
- установка вырезанной в размер открытого пространства оснастки деревянной крышки, а также металлического плунжера, к которому прикладывается нагрузка в процессе испытания.

Подготовка к проведению испытаний замкнутых формообразующих элементов несъемной опалубки цилиндрической формы выполнялась сходным об-

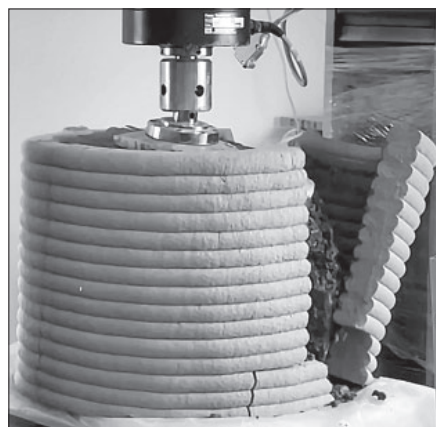


Рис. 9. Процесс подготовки к испытанию под действием давления бетонной смеси (на примере испытания единичного прямоугольного элемента)

Fig. 9. The process of preparing for testing under the influence of pressure of a concrete mixture (using the example of testing a single rectangular element)

Рис. 10. Момент разрушения образца опалубки замкнутой цилиндрической формы под воздействием усиленного при помощи пресса гидростатического давления бетонной смеси

Fig. 10. The moment of destruction of a formwork sample of a closed cylindrical shape under the influence of hydrostatic pressure of the concrete mixture reinforced using a press

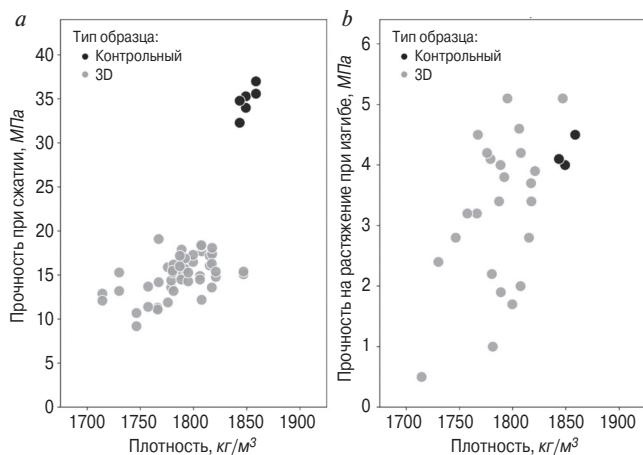


Рис. 11. Прочность образцов из материала для аддитивного строительного производства, изготовленных различным способом: *a* – сжатие; *b* – растяжение при изгибе

Fig. 11. Strength of additive manufacturing material samples produced in different ways: *a* – compression; *b* – stretching during bending

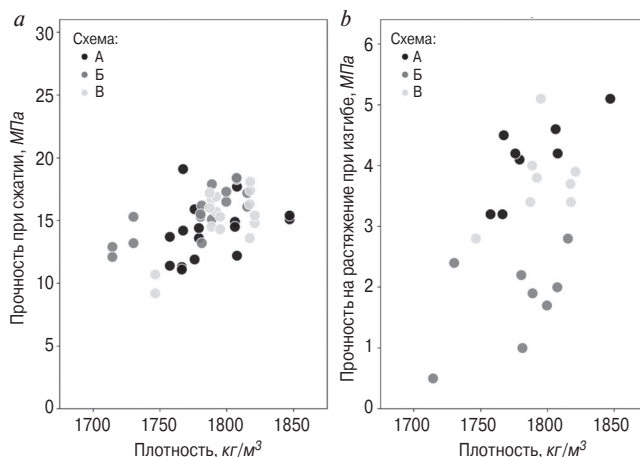


Рис. 12. Прочность образцов, отобранных из напечатанных конструкций в зависимости от схемы проведения испытания (рис. 4): *a* – сжатие; *b* – растяжение при изгибе

Fig. 12. Strength of samples taken from printed structures depending on the test scheme (Fig. 4): *a* – compression; *b* – stretching during bending

разом, однако для испытаний этих конструкций не использовалась оснастка, а бетонная смесь помещалась непосредственно в полость внутри цилиндрического фрагмента (рис. 10).

Скорость нагружения при испытании фрагментов несъемной бетонной опалубки, изготовленной по технологии аддитивного строительного производства, подбиралась таким образом, чтобы испытание длилось более 30 с.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе (рис. 11) образцов-призм размером 160×40×40 мм, вырезанных из конструкции прямолинейной стенки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, а также образцов, изготовленных традиционным способом – методом формования по ГОСТ Р 58277–2018 «Смеси сухие строительные на

цементном вяжущем. Методы испытаний», показывает, что для образцов, отобранных из напечатанных конструкций, наблюдается значительно большая дисперсия единичных значений прочности при сжатии и растяжении при изгибе, а также плотности, чем для контрольных образцов. Кроме этого, средняя прочность и плотность образцов, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, существенно ниже, чем в контрольной серии. Наиболее явно эта особенность проявляется в результатах определения прочности при сжатии, где средние значения для образцов, отобранных из напечатанных конструкций, оказались вдвое ниже, чем в контрольной серии.

Следует отметить, что в настоящей работе использовался состав материала для аддитивного строительного производства, идентичный составу, применяемому ранее при выполнении исследования [12]. Результаты текущей работы подтвердили

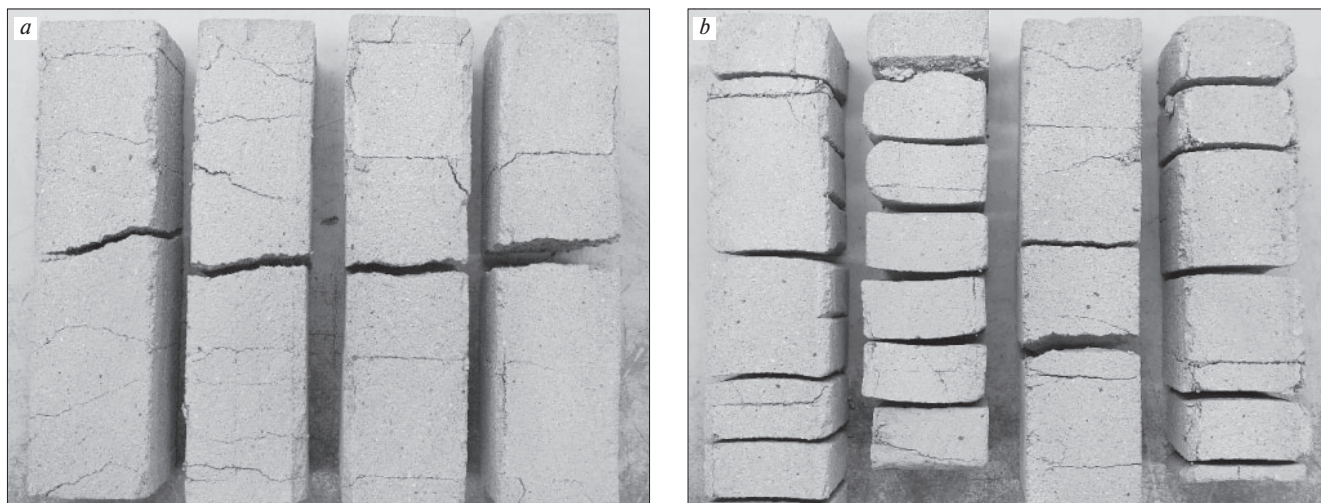


Рис. 13. Пример характера разрушения образцов после проведения испытаний на растяжение при изгибе и сжатии по ГОСТ Р 59097–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования» по схеме А (а) и по схеме В (б)

Fig. 13. An example of the nature of destruction of samples after tensile tests during bending and compression in accordance with GOST R 59097–2020 «Materials for additive construction production. Technical requirements» according to scheme A (a) and according to scheme B (b)

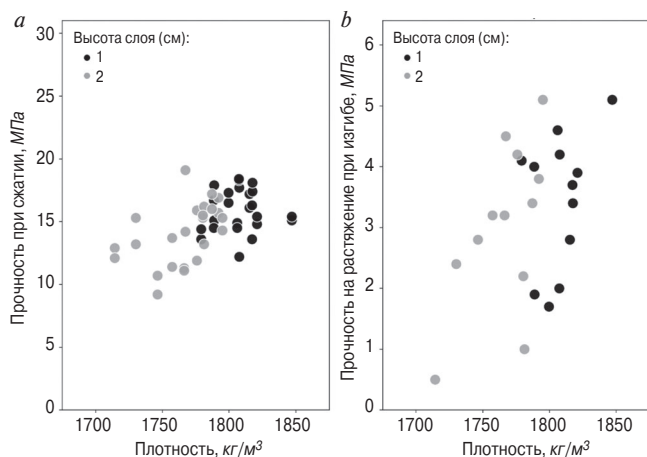


Рис. 14. Прочность образцов, отобранных из напечатанных конструкций с различной высотой печатного слоя: а – сжатие; б – растяжение при изгибе

Fig. 14. Strength of samples selected from printed structures with different heights of the printed layer: a – compression; b – stretching during bending

полученные ранее выводы о более значительной вариативности плотности и прочности образцов, отобранных из конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, по сравнению с традиционным способом формования и уплотнения бетона в опалубке. Однако в текущей работе снижение прочности при сжатии исследуемых образцов, отобранных из напечатанных конструкций, по сравнению с контрольными образцами оказалось более значительным, чем в предыдущем исследовании. В связи с тем, что в предыдущей работе испытывались образцы цилиндрической формы, отобранные из конструкций методом алмазного выбуривания кернов, а в текущем исследовании образцы-призмы размером 40×40×160 мм выпиливались и дополнительно шлифовались, более существенное падение прочности при сжатии образцов, отобранных из конструкций, изготовленных с применением технологии аддитив-

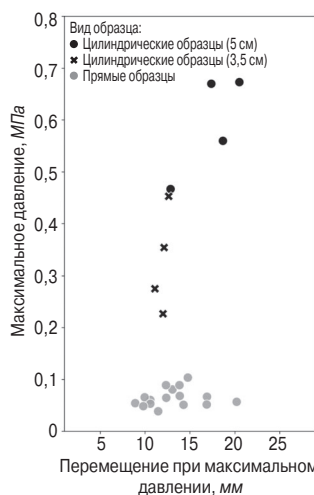


Рис. 15. Результаты оценки несущей способности формообразующих элементов различной формы под воздействием давления бетонной смеси

Fig. 15. Results of assessing the load-bearing capacity of formative elements of various shapes under the influence of pressure of concrete mixture

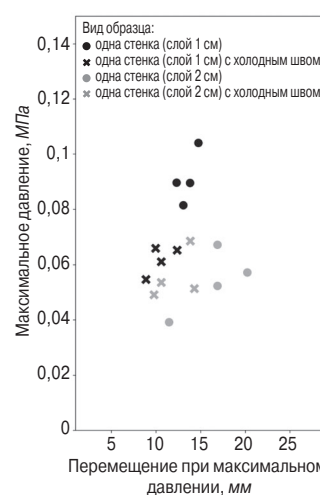


Рис. 16. Результаты оценки несущей способности прямолинейных формообразующих элементов под воздействием давления бетонной смеси

Fig. 16. Results of assessing the load-bearing capacity of rectilinear form-building elements under the influence of pressure of concrete mixture

ного строительного производства, свидетельствуют о высокой степени влияния способа отбора испытываемых образцов на получаемые значения ключевых физико-механических характеристик.

Известная и наиболее часто описываемая в различных работах [14–21] особенность снижения прочности бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, в зоне соединения печатных слоев в сравнении с монолитным бетоном отражается на результатах определения прочности образцов на растяжение при изгибе (рис. 12) по схеме В (рис. 4), что подтверждает анизотропию свойств бетонных конструкций, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства.

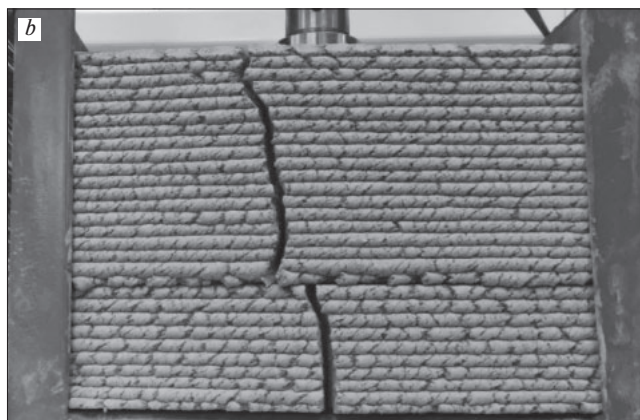
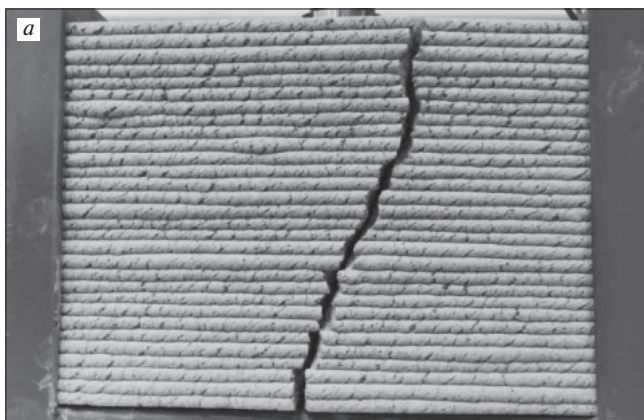


Рис. 17. Характер разрушения прямоугольного элемента несъемной опалубки с высотой печатного слоя 1 см: без холодного шва (а) и с холодным швом (b)

Fig. 17. The nature of the destruction of a rectangular element of permanent formwork with a printed layer height of 1 cm: without a cold seam (a) and with a cold seam (b)



Рис. 18. Характер разрушения прямоугольного элемента несъемной опалубки с высотой печатного слоя 2 см: без холодного шва (а) и с холодным швом (b)

Fig. 18. The nature of destruction of a rectangular element of permanent formwork with a printed layer height of 2 cm: without a cold seam (a) and with a cold seam (b)

Следует отметить, что в отличие от прочности на растяжение при изгибе в проведенной серии испытаний данный фактор в значительно меньшей степени повлиял на полученные результаты прочности при сжатии, однако он также отразился на характере разрушения образцов (рис. 13).

Также в ходе исследования было установлено, что при печати конструкций с высотой слоя 1 см можно получить в среднем более высокие значения плотности отбираемых из конструкции образцов и меньший разброс значений прочности при сжатии, чем при использовании высоты слоя 2 см (рис. 14).

Боковое давление бетонной смеси, выдерживаемое формообразующими элементами несъемной опалубки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, было рассчитано с учетом ранее представленной схемы (рис. 2) и фактической площади деревянной крышки, через которую передавалась нагрузка от испытательного пресса на поверхность бетонной смеси, загруженной внутрь опалубки каждого исследуемого в работе типоразмера. Полученное значение максимального давления (рис. 15, 16) соответствует моменту разру-

шения или потери несущей способности испытуемого элемента опалубки.

Полученные данные (рис. 15) свидетельствуют, что несъемная бетонная опалубка цилиндрической формы, изготовленная с применением технологии аддитивного строительного производства, способна обеспечить значительно более высокую несущую способность под воздействием давления бетонной смеси даже при меньших значениях ширины печатного слоя. Использование такой формы внешнего контура вертикальных конструкций способно обеспечить значительное увеличение высоты бетонирования при снижении материалоемкости процесса 3D-печати несъемной опалубки.

Результаты определения прочности единичного прямоугольного элемента показали, что печать стенок с высотой каждого слоя 1 см позволяет достичь более высокой несущей способности конструкции и воспроизводимости результатов испытаний, чем при печати слоями по 2 см. Возникновение холодных швов в процессе печати конструкций приводит к ухудшению несущей способности. Однако для слоя высотой 2 см этот эффект незаметен из-за изначаль-

но более низкой прочности и стабильности получаемых результатов.

Наличие холодного шва отражается на характере разрушения образцов. На фото прямоугольных элементов несъемной опалубки, разрушенных под воздействием моделируемого давления бетонной смеси, можно заметить, что при отсутствии холодного шва элемент разрушается с формированием сплошной трещины по всей высоте элемента, в то время как при наличии холодного шва каждая часть элемента до холодного шва и после него может разрушаться по отдельности (рис. 17, 18).

Заключение

Использование технологии 3D-печати бетоном (3DCP в международной терминологии) для изготовления несъемной бетонной опалубки является одним из перспективных и быстро развивающихся подходов применения аддитивных технологий в строительстве. Использование технологии аддитивного строительного производства для изготовления несъемной опалубки, заполняемой в последующем бетоном различной плотности или сыпучими теплоизоляционными материалами, применяется на сегодняшний день большинством компаний-лидеров на мировом рынке строительной 3D-печати.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что при печати вертикальной несъемной опалубки следует учитывать, что на фактическую несущую способность конструкции оказывает влияние не только выбранная расчетно-конструктивная схема, ширина сечения формообразующих элементов и физико-механические свойства применяемого материала для аддитивного строительного производства, но также режим печати, включая высоту печатного слоя и возможность возникновения холодных швов из-за технологических пауз в процессе печати.

При проектировании и расчете конструкций несъемной бетонной опалубки и других воспринимающих нагрузки элементов, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, следует учитывать, что бетонные конструкции, изготовленные методом послойной экструзии, могут обладать меньшей плотностью и прочностью, чем конструкции, изготовленные из того же материала методом формования и последующего виброуплотнения, а также иметь большую вариативность и анизотропию прочностных характеристик.

При уменьшении высоты печатного слоя возможно получить большую плотность бетона в конструкции и меньший разброс физико-механических характеристик за счет лучшего уплотнения каждого слоя, однако неоптимальный подбор соотношения высоты к ширине слоя может приводить к возникновению надрывов по краям слоя и ухуд-

шать качество поверхности возводимой конструкции (рис. 5 и 17).

Изменение толщины сечения формообразующих элементов, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, влияет нелинейно на несущую способность (рис. 15), в отличие от более традиционных формообразующих элементов, изготовленных из изотропных материалов. Это может быть связано, в частности, с неравномерным уплотнением бетонной смеси по ширине печатного слоя в процессе экструзии, которое оказывает влияние на расчетные физико-механические свойства конструкции.

В случае проектирования конструкций несъемной опалубки, предусматривающих необходимость единовременного бетонирования на значительную высоту, следует отдавать предпочтение конструкциям замкнутой цилиндрической формы, так как они способны выдерживать значительно более высокое давление бетонной смеси в сравнении с прямолинейными элементами.

Список литературы / References

1. Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О. Международный опыт исследований в области аддитивного строительного производства // *Жилищное строительство*. 2023. № 11. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-11-4-10>
1. Pustovgar A.P., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. International research experience in the field of additive construction manufacturing. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 11, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-11-4-10>
2. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J. Digital concrete: a review. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. 105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
3. Bing Lu, Yiwei Weng, Mingyang Li, Ye Qian, Kah Fai Leong, Ming Jen Tan, Shunzhi Qian. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 207, pp. 477–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>
4. Shakor Pshtiwan, Nejadi Shami, Paul Gavin, Malek Sardar. Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*. 2018. Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>
5. Shaodan Hou, Zhenhua Duan, Jianzhuang Xiao, Jun Ye. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 273. 121745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121745>

6. Lyu F., Zhao D., Hou X., Sun L., Zhang Q. Overview of the development of 3d-printing concrete: a review. *Applied Sciences*. 2021. No. 11. 9822 <https://doi.org/10.3390/app11219822>
7. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 9. С. 12–20.
7. Pustovgar A.P., Adamtsevich A.O., Volkov A.A. Technology and organization of additive construction. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 9, pp. 12–20. (In Russian).
8. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 28–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
9. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>
9. Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kinzyabulatoва D.F., Nedoseko I.V. The use of gypsum compositions in the technologies of construction 3D printing of low-rise residential buildings. Problems and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>
10. Binrong Zhu, Behzad Nematollahi, Jinlong Pan, Yang Zhang, Zhenxin Zhou, Yamei Zhang. 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 121. 104039. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104039>
11. Leung C., Qian C. Development of pseudo-ductile permanent formwork for durable concrete structures. *Materials and Structures*. 2010. Vol. 43 (7), pp. 993–1007. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9561-4>
12. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
12. Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P. Additive manufacturing in construction: the research of the anisotropy concrete strength effect. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
13. Panda B., Mohamed N.A.N., Paul S.C., Singh G.V.P.B., Tan M.J., Šavija B., The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12 (13). 2149. <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
14. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
15. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205, pp. 586–601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
16. Tay Y.W.D., Ting G.H.A., Qian Y., Panda B., He L., Tan M.J. Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete. *Virtual and Physical Prototyping*. 2019. Vol. 14. Iss. 1, pp. 104–113. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1500420>
17. Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., Ghani, Z., Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 227. 116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
18. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 110. 103571. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103571>
19. Hosseini E., Zakertabrizi M., Korayem A.H., Xu G. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 99, pp. 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.008>
20. Dressler I., Freund N., Lowke D. The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 2. 374. <https://doi.org/10.3390/ma13020374>
21. Kloft H., Krauss et all. Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106078. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106078>