

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.332.4

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при адгезии материалов для 3D-печати

Илья Омарович Раббаа, Оксана Александровна Ларсен

Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В технологии строительной 3D-печати при больших объемах бетонирования требуется обеспечение технологических перерывов и разделение объекта на захватки, при этом растворная смесь должна успевать обрести несущую способность материала при наращивании высоты вертикальных элементов. Особенностью ведения работ с применением этой технологии строительства являются проблемы образования «холодных» швов, связанные с обеспечением прочности сцепления граничащих слоев при одновременном регулировании требуемых реологических и технологических показателей материалов для 3D-печати. Большинство исследований затрагивает работу цементных систем по сравнению с гипсовыми в связи со сложностями регулирования сроков схватывания и водостойкости камня. Активные минеральные добавки используются для регулирования реологических свойств растворной смеси. Органические добавки могут повышать прочность сцепления и адгезию, но требуют совместимости с другими группами добавок. Для этого необходимо изучение влияния органической модифицирующей добавки и гидрофобизатора на адгезионную прочность с бетонным основанием.

Материалы и методы. Приготовление растворной смеси и водного раствора органической полифункциональной добавки проводилось по установленному режиму с учетом полного диспергирования модифицирующего компонента в воде при последующем изготовлении и хранении образцов испытаний в соответствии с методикой, регламентированной нормативными документами.

Результаты. Результаты испытания показывают на снижение адгезии материала к бетону при добавлении модификатора вязкости и совместном использовании с гидрофобизатором, поскольку при взаимодействии на границе раздела растворной смеси с бетоном не обеспечивается протекание процессов образования физико-химической связи. Также при введении гидрофобного компонента в состав растворной смеси наблюдается пластифицирующее действие с увеличением проникающей способности во внутренние слои бетона, на что указывают изменения преимущественно когезионного характера разрушения образцов на адгезионный при появлении участков с видом отрыва по материалу основания.

Выводы. Обоснована и подтверждена актуальность обеспечения совместимости органического модификатора и гидрофобизатора для адгезионной прочности материала в аддитивном строительном производстве. Актуальность темы дальнейшей работы заключается в установлении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки с целью обеспечения высоких значений адгезионной прочности и проникающей способности растворной смеси.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, материалы для АСП, аддитивные технологии, органическая полифункциональная добавка, гидрофобизатор, прочность сцепления с основанием, композиционное гипсовое вяжущее, межслойная адгезия

Благодарности. Исследование выполнено на оборудовании, предоставленном Научно-исследовательским институтом строительных материалов и технологий НИУ МГСУ (URL: <https://nii-smit.ru/>).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Раббаа И.О., Ларсен О.А. Совместимость модификаторов вязкости и гидрофобизаторов при адгезии материалов для 3D-печати // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 4. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Автор, ответственный за переписку: Илья Омарович Раббаа, ilya_rabbaa@mail.ru.

Compatibility of viscosity modifiers and water repellent on adhesion of 3D printing materials

Ilya O. Rabbaa, Oksana A. Larsen

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the technology of construction 3D printing, with large volumes of concreting, it is necessary to ensure technological breaks and divide the object into sections, while the mortar mixture must have time to acquire the bearing capacity of the material when increasing the height of vertical elements. The peculiarity of conducting work using this construction technology results in problems of forming "cold" joints associated with ensuring the strength of the adhesion of adjacent layers while simultaneously regulating the required rheological and technological parameters of materials for 3D printing. Most studies concern the operation of cement systems in comparison with gypsum systems due to the difficulties in regulating the setting time and water resistance of the stone. Active mineral additives are used to regulate the rheological properties of the mortar mixture. Organic additives can increase the strength of adhesion and adhesion, but require compatibility with other groups of additives. This requires studying the effect of an organic modifying additive and a water repellent on the adhesive strength with a concrete base.

Materials and methods. The preparation of the solution mixture and the aqueous solution of the organic polyfunctional additive was carried out according to the established mode, taking into account the complete dispersion of the modifying component in water during the subsequent production and storage of test specimens in accordance with the methodology regulated by regulatory documents.

Results. The test results indicate a decrease in the adhesion of the material to concrete when adding a viscosity modifier when used together with a water repellent, since the interaction at the interface of the mortar mixture with concrete does not ensure the formation of a physical and chemical bond. Also, when introducing a hydrophobic component into the composition of the mortar mixture, a plasticizing effect is observed with an increase in penetrating ability into the inner layers of concrete, which is indicated by changes in the predominantly cohesive nature of the destruction of specimens to adhesive with the appearance of areas with a type of tearing along the base material.

Conclusions. The relevance of ensuring the compatibility of an organic modifier and a water repellent to ensure the adhesive strength of the material in additive construction production is substantiated and confirmed. The relevance of the topic of further work lies in establishing a rational ratio of a water repellent and an organic additive to ensure high values of adhesive strength and penetrating ability of the mortar mixture.

KEYWORDS: construction, materials for ACP, additive technologies, organic multifunctional additive, hydrophobisator, adhesion strength to the base, composite gypsum binder, interlayer adhesion

Acknowledgements. The study was carried out using equipment provided by the Research Institute of Building Materials and Technologies of the Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). (URL: <https://nii-smit.ru/>).

FOR CITATION: Rabbaa I.O., Larsen O.A. Compatibility of viscosity modifiers and water repellent on adhesion of 3D printing materials. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(4):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.4.9

Corresponding author: Ilya O. Rabbaa, ilya_rabbaa@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Технология возведения строительных объектов с применением строительной трехмерной печати подразумевает наличие технологических перерывов в работе оборудования и разделение объекта на технологические захватки. По прошествии времени нанесенная растворная смесь успевает приобрести кристаллизационную структуру с набором прочности для обеспечения несущей способности материала [1–3], на который начинают оказывать воздействие нарастающие слои укладки, после чего затвердевший цементный камень следует рассматривать в качестве основания под нанесение материала для аддитивного строительного производства (АСП), поскольку возникает риск возникновения холодных швов [4, 5].

У материалов для АСП, применяемых на строительном рынке, существуют не решенные в полной мере трудности в обеспечении прочности сцепления затвердевшего цементного камня граничащих слоев в связи с технологическими принципами при экструдировании растворной смеси через сопло 3D-принтера, а также адгезии к поверхности нанесения, выражаемые бесшовным переходом при увеличении уровня возведения вертикальной конструкции, в результате чего требуется проведение мероприятий по обеспечению однородности характеристик сцепления материала строительного

объекта с целью соответствия принципам монолитности. Озвученная проблема в современном способе ведения строительства затрагивается в научных работах [6, 7], для решения которых предлагается регулировка рецептуры состава для строительной 3D-печати путем обеспечения сохранности технологических показателей во времени при одновременном придании нанесенному материалу несущей способности с использованием активных минеральных добавок (МД) в качестве модификаторов реологических свойств растворной смеси.

Большинство исследовательских работ по изучению реологических и технологических показателей материалов для строительной 3D-печати затрагивает смеси, приготовленные на цементном вяжущем по сравнению с гипсовым и его композитными аналогами [8], поскольку подобный выбор сырья обусловлен простотой гарантии сохранности технологических свойств растворной смеси в соответствии с установленным режимом и требуемой скоростью возведения, а также отсутствием возможности получения композиционного вяжущего с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками с применением вяжущего низкой марки. К наиболее значимым проблемам использования гипсового сырья при разработке рецептуры материала для АСП относится обеспечение легкости регулирования сроков схватывания и стойкости

к воздействию воды гипсового камня, выражаемое коэффициентом его размягчения.

Для требуемых показателей материалов на многокомпонентном гипсовом вяжущем для аддитивных строительных технологий предлагается применение активных МД, участвующих в регулировании реологических и технологических свойств растворной смеси и обеспечивающих гидравлическую активность применяемого вяжущего [9]. В некоторых научных трудах авторов, посвященных изучению реологических свойств растворной смеси с помощью МД, было установлено, что их эффективность действия в качестве модификаторов вязкости системы возможна при значительных расходах по массе вяжущего [10–12]. По этой причине в качестве эффективных добавок, модифицирующих реологические свойства растворной смеси, используют материалы органического происхождения, которые также могут повышать прочность сцепления граничащих слоев материала и к основанию нанесения, однако при этом следует руководствоваться их совместимостью с другими применяемыми добавками в составе смеси, поскольку препятствие действию одного из компонентов механизму работы другого ведет к снижению эффективности работы состава, затрудняя при этом подбор рецептуры [13–15].

В целях настоящей работы поставлена задача изучения влияния органической модифицирующей добавки полифункционального назначения на адгезионную прочность с бетонным основанием. Кроме того, важно учитывать его совместимость с гидрофобизаторами при подборе оптимального соотношения в составе на композиционном гипсовом вяжущем для повышения водостойкости затвердевшего камня, поскольку отсутствие соблюдения этого условия может привести к снижению эффекта отталкивания и, как следствие, к увеличению водопоглощения материала, а также снижению адгезионной прочности материала за счет нейтрализации действия макромолекул модификатора по образованию полимерной связи с основанием нанесения и других эксплуатационных характеристик [16, 17].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья, применяемого для исследовательской работы и удовлетворяющего требованию нормативного документа на материалы для аддитивного строительного производства, использованы следующие компоненты:

1) гипсовое вяжущее высокопрочное марки Г-16 Б II (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат») в соответствии с ГОСТ 125–2018;

2) гипсовое вяжущее строительное марки Г-5 Б II (ЗАО «Самарский гипсовый комбинат») в соответствии с ГОСТ 125–2018;

3) портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (АО «Белгородский цемент») в соответствии с ГОСТ 31108–2020;

4) зола-уноса (ООО «ЭКО-Золопродукт») в соответствии с ТУ 5712-003-84800065–2010;

5) мелкий пористый заполнитель, полученный из отсева дробления некондиционной фракции пеностеклянного щебня фракции с размером зерен 0,63–0,16 мм;

6) порошкообразный суперпластификатор Sika ViscoCrete-226 P на основе эфиров поликарбоксилатов;

7) гидрофобизирующая добавка: порошок олеат натрия с содержанием вещества не менее 95 %;

8) органическая полифункциональная добавка, выполняющая функцию модификатора вязкости с внутренним шифром VM-XG;

9) водопроводная вода питьевая в соответствии с ГОСТ 23732–2011.

Расходы компонентов для получения материала исследования были приняты на основании ранее разработанного состава, применяемого при изучении реологических свойств и технологических показателей растворной смеси с модифицирующим компонентом. Количество гидрофобизатора для приготовления материала принято 0,3 % от массы сухой смеси. Определение прочности сцепления раствора с бетонным основанием выполнили по методике ГОСТ Р 58276–2018. Приготовление растворной смеси с целью изготовления образцов испытаний проводили по следующему режиму: перемешивание компонентов в течение 120 с, затем остановка смесителя на 90 с для снятия налипшей растворной смеси на лопасть и смесительную чашу, далее осуществляли повторное перемешивание в течение 60 с для обеспечения суммарного времени перемешивания, равного 3 мин.

Затворение сухой смеси производили с помощью 8%-ного водного раствора органической полифункциональной добавки. Для обеспечения полного протекания процесса диспергирования модифицирующего компонента в объеме жидкой фазы проводили периодическое перемешивание набухающего модификатора с помощью дрели с лопастью насадкой с частотой вращения не более 450 об/мин. С целью устранения влияния непрогидратировавшихся частиц органической полифункциональной добавки на образование дефектов в затвердевшем гипсовом камне использовали приготовленный гель в качестве затворителя сухой смеси не ранее чем через 90 мин от момента начала приготовления раствора модификатора вязкости.

Нанесение приготовленной растворной смеси на поверхность бетонной плиты-основания, изготовленной в соответствии с требованием ГОСТ Р 58277–2018, выполнили с помощью шпателя с шириной лезвия 10 мм в один прием с прижатием смеси и выравниванием лицевой поверхности образцов стальной линейкой. Для изготовления образцов длиной ребра 50 мм использовался силиконовый аппликатор, обеспечивающий толщину нанесения слоя растворной смеси 5 мм. Снятие аппликатора

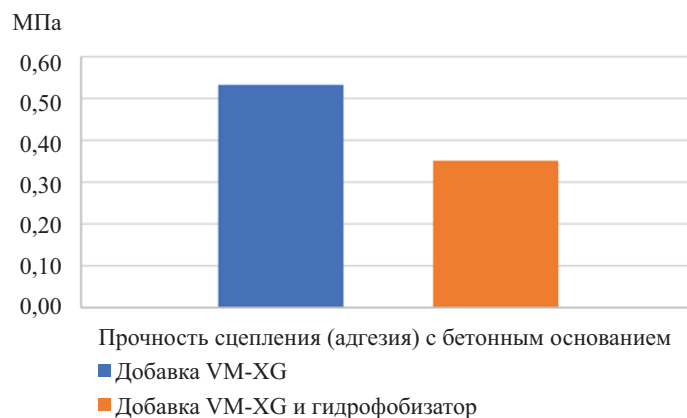


Рис. 1. Влияние органической полифункциональной добавки и гидрофобизатора на адгезию материала для АСП

с плиты основания осуществлялось при руководстве сохраняемостью свойств растворной смеси, предварительно проводилось подрезание внешней грани вдоль отверстий аппликатора при помощи лезвия для предотвращения возможности нарушения целостности изготовленных образцов.

Хранение плиты-основания с образцами испытания осуществлялось в течение 7 сут в помещении, обеспечивающем поддержание температуры и относительной влажности воздуха $t = (22 \pm 2)^\circ\text{C}$ и $\varphi = (52 \pm 10) \%$ соответственно. По прошествии времени хранения плиты к затвердевшим образцам приклеи-



a



b



c

Рис. 2. Внешний вид образцов для определения прочности сцепления (адгезии) материала для АСП с бетонным основанием: a — перед приклеиванием штампов; b — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой; c — после отрыва серии образцов с органической модифицирующей добавкой и гидрофобизатором

вались стальные штампы квадратного сечения (размер граней 50 мм) с помощью двухкомпонентного клея на основе эпоксидной смолы. Перед наклеиванием штампов проводилось выравнивание поверхности материала испытания путем затирки образцов с использованием шлифовальной бумаги с последующим обеспыливанием поверхности. Испытание на адгезионный отрыв образцов от бетонной плиты осуществлялось по истечении 24 ч от момента приклеивания штампов с помощью портативной испытательной машины для измерений усилия отрыва (адгезии) HP 1000 Haftprüfsystem с применением гидравлического силового цилиндра с максимальным измеряемым усилием отрыва 9 кН при скорости нарастания нагрузки 250 ± 50 Н/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам исследования материала для АСП с применением органической полифункциональной добавки было установлено ее влияние на прочность сцепления с бетонным основанием и совместимость с гидрофобизатором в составе затвердевшего раствора (рис. 1).

Из полученных значений прочности сцепления серии образцов можно наблюдать снижение адгезии материала к бетонному основанию с 0,53 до 0,35 МПа при добавлении гидрофобизирующей добавки совместно с модификатором в состав сухой смеси. Подобное проявление подтверждается механизмом действия гидрофобных компонентов, механизм действия которых заключается в протекании химических процессов на границе раздела поверхности затвердевающего раствора и основания, а также внутри микродефектов бетона с образованием пленок, препятствующих дальнейшему капиллярному подосу воды из растворной смеси, которое необходимо для образования физико-химической связи с бетоном [18, 19].

В ходе визуальной оценки характера отрыва (рис. 2) определено, что образцы состава затвердевшего камня при применении органической полифункциональной добавки обеспечивают 55,2 % когезионного разрушения и 44,8 % адгезионного разрушения в серии образцов испытания. В то же

время серия образцов, изготовленных при совместном использовании модифицирующего компонента и гидрофобизатора, обладает долей поверхности испытанного раствора с разрушением материала основания, равным 25,3 %.

Подобное изменение характера отрыва от бетонной поверхности при содержании гидрофобизатора в растворной смеси может быть объяснено предположением, что многие виды добавок из этой группы обладают пластифицирующим эффектом, при котором увеличивается проникающая способность растворной смеси с заполнением микродефектов и капиллярных пор бетонного основания [20, 21]. Такое предположение также подтверждается улучшением удобоукладываемости растворной смеси и легкости ее перемешивания в чаше смесителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснована возможность совместного использования органического модификатора реологических свойств и гидрофобизатора с целью обеспечения адгезионной прочности растворной смеси для 3D-печати на композиционном гипсовом вяжущем с оптимальным соотношением компонентов для межслойной адгезии.

Установлено, что введение гидрофобизатора совместно с модифицирующей добавкой способствует снижению адгезионной прочности к бетону. Применение адгезионной гидрофобизации приводит к снижению прочности сцепления на 34,2 %. Изучение характера отрыва затвердевшего раствора к бетонному основанию свидетельствует об увеличении проникающей способности растворной смеси, что объясняется положительным влиянием гидрофобизатора на улучшение консистенции растворной смеси, обеспечение связности системы.

Актуальность темы будущих исследований заключается в определении рационального соотношения гидрофобизатора и органической добавки полифункционального назначения для обеспечения высоких значений адгезионной прочности затвердевшего материала и проникающей способности растворной составляющей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Иноземцев А.С.* Современная теория и практика технологии бетонов для 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 2. С. 216–245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX.
2. *Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганишина Л.В.* Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 1 (67). С. 127–134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB.
3. *Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F.* 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 14–22.
4. *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. Pp. 172–196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
5. *Гончарова Ю.Ю., Дроботов А.В., Торубаров И.С., Волохов М.А.* Исследование адгезионных свойств поверхностей для 3D-печати // Cifra.

Машиностроение. 2024. № 2 (3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM.

6. Толстой А.Д., Лесовик В.С., Новиков К.Ю. Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 2 (17). С. 174–180. EDN WHAIQB.

7. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 179. Pp. 125–137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202

8. Potapova E., Guseva T., Shchelchkov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1037. Pp. 26–31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26

9. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В., Слепухин А.С., Крушельницкая Е.А., Толстой А.Д. Влияние модифицирующей добавки с гидрофобизирующим эффектом на повышение эксплуатационных характеристик вибропрессованных изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 9. С. 8–13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR.

10. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.

11. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Управление реологическим поведением смесей для строительной 3d-печати: экспериментальная оценка возможностей арсенала «нано» // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2019. Т. 11. № 3. С. 325–334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG.

12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Pp. 59–65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9

13. Славчева Г.С., Шведова М.А., Бабенко Д.С. Анализ и критериальная оценка реологического поведения смесей для строительной 3D-печати // Строительные материалы. 2018. № 12. С. 34–40.

DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV.

14. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Котова К.С., Шведова М.А., Юров П.Ю. Исследования факторов регулирования прочности адгезионного соединения «цементная матрица – армирующее волокно» в композитах для строительной 3D-печати // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 2. С. 124–133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN HIGENO.

15. Wang Y., Qiu L., Chen S., Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 411. P. 134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403

16. Строганов В.Ф., Амельченко М.О., Мухаметрахимов Р.Х., Вдовин Е.А., Табаева Р.К. Повышение уровня адгезии стирол-акриловых покрытий, модифицированных наполнителем — шунгитом при защите строительных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 9. С. 29–32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL.

17. Tao Y., Yuan Y., Vantuyghem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. 2021. Vol. 118. Issue 6. DOI: 10.14359/51733105

18. Сураев В.А. Гидрофобизация. Теория и практика // Технологии строительства. 2002. № 1 (17). С. 120–121.

19. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics // Applied Surface Science. 2018. Vol. 450. Pp. 492–501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204

20. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes // Petroleum Chemistry. 2018. Vol. 58. Issue 4. Pp. 279–288. DOI: 10.1134/s0965544118040035

21. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — a First Feasibility Study // RILEM Bookseries. 2020. Pp. 978–987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Поступила в редакцию 27 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 24 сентября 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илья Омарович Раббаа** — инженер Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий, аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ilya_rabbaa@mail.ru;

Оксана Александровна Ларсен — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; LarsenOA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Раббаа И.О. — концепция исследования, сбор материала, изготовление образцов, проведение испытаний, обработка результатов, написание исходного текста, формулирование выводов.

Ларсен О.А. — научное руководство, концепция исследования, научное консультирование, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The technology of constructing buildings using three-dimensional printing involves technological breaks in the operation of equipment and the division of the object into technological sections. Over time, the applied mortar mixture acquires a crystalline structure with a set of strengths to ensure the load-bearing capacity of the material [1–3], which begins to be affected by the growing layers of the structure. After that, the hardened cement stone should be considered as a base for the application of material for additive construction production (ACP), as there is a risk of cold joints [4, 5].

Materials for ACP used in the construction market have unresolved difficulties in ensuring the strength of the bond between the hardened cement stone and the adjacent layers due to the technological principles of extruding the mortar mixture through the nozzle of a 3D printer, as well as adhesion to the application surface, expressed by a seamless transition as the level of vertical construction increases, as a result of which measures are required to ensure the uniformity of the adhesion characteristics of the construction material in order to comply with the principles of monolith city. The problem raised in the modern method of construction is addressed in scientific works [6, 7], which propose adjusting the composition of the mixture for 3D construction printing by ensuring the stability of technological indicators over time while simultaneously imparting load-bearing capacity to the applied material using active mineral additives (MA) as modifiers of the rheological properties of the mortar mixture.

Most research studies on the rheological and technological indicators of materials for 3D construction printing concern mixtures prepared with cementitious binders rather than gypsum and its composite analogues [8], since this choice of raw materials is due to the ease of ensuring the preservation of the technological properties of the mortar mixture in accordance with the established regime and the required speed of construction, as well as the inability to obtain a composite binder with high technical and operational characteristics using a low-grade binder. One of the most significant problems in the use of gypsum raw materials in the development of a material formulation for ACP is ensuring the ease of controlling the setting time and water resistance of gypsum stone, expressed by its softening coefficient.

To achieve the required performance of materials based on multicomponent gypsum binders for additive construction technologies, it is proposed to use active MA that participate in regulating the rheological and technological properties of the mortar mix-

ture and ensure the hydraulic activity of the binder used [9]. In some scientific works by authors devoted to the study of the rheological properties of mortar mixtures using MA, it was established that their effectiveness as viscosity modifiers of the system is possible at significant costs in terms of binder mass [10–12]. For this reason, materials of organic origin are used as effective additives that modify the rheological properties of mortar mixtures, which can also increase the adhesion strength of the boundary layers of the material to the application base. However, their compatibility with other additives used in the mixture should be taken into account, since the interference of one component with the mechanism of action of other leads to a decrease in the effectiveness of the composition, making it difficult to select the right formulation [13–15].

The aim of this work is to study the effect of a multifunctional organic modifying additive on the adhesive strength with a concrete base. In addition, it is important to consider its compatibility with water repellents when selecting the optimal ratio in the composition of a composite gypsum binder to increase the water resistance of the hardened stone, since failure to comply with this condition may lead to a decrease in the repellent effect and, as a result, an increase in the water absorption of the material, as well as a decrease in the adhesive strength of the material due to the neutralization of the action of the macromolecules of the modifier in the formation of a polymer bond with the application base and other performance characteristics [16, 17].

MATERIALS AND METHODS

The following components were used as raw materials for the research work, which meet the requirements of the regulatory document on materials for additive construction production:

- 1) high-strength gypsum binder grade G-16 B II (“Samara Gypsum Plant” CJSC) in accordance with GOST 125–2018;
- 2) gypsum binder for construction, grade G-5 B II (“Samara Gypsum Plant” CJSC) in accordance with GOST 125–2018;
- 3) Portland cement CEM I 42.5N (“Belogorodsky Cement” JSC) in accordance with GOST 31108–2020;
- 4) fly ash (“ECO-Zoloprodukt” LLC) in accordance with TU 5712-003-84800065–2010;
- 5) fine porous filler obtained from the screening of crushed substandard foam glass aggregate with a grain size of 0.63–0.16 mm;

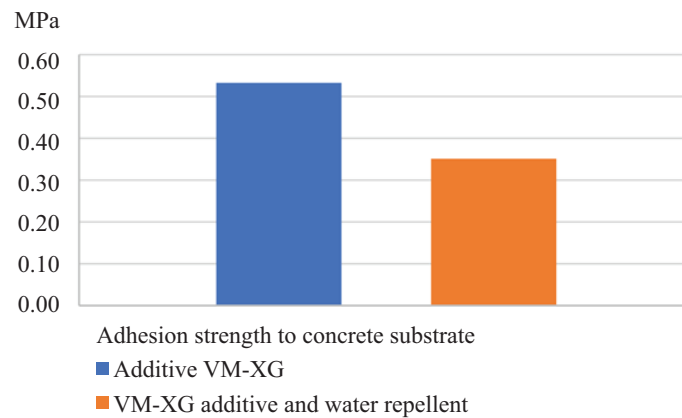


Fig. 1. Effect of organic multifunctional additive and water repellent on the adhesion of material for ACP

6) Sika ViscoCrete-226 P powder superplasticizer based on polycarboxylate esters;

7) hydrophilizing additive: powdered sodium oleate with a substance content of at least 95 %;

8) organic multifunctional additive acting as a viscosity modifier with internal code VM-XG;

9) drinking tap water in accordance with GOST 23732–2011.

The costs of the components for obtaining the research material were accepted based on a previously developed composition used in studying the rheological properties and technological indicators of a mortar mixture with a modifying component. The amount of water repellent for preparing the material was accepted as 0.3 % of the dry mixture weight. The adhesion strength of the mortar to the concrete base was determined according to the method specified in GOST R 58276–2018. The mortar mixture for the preparation of test specimens was prepared according to the following procedure: mixing of components for 120 seconds, then stopping the mixer for 90 seconds to remove the mortar mixture adhering to the blade and mixing bowl, followed by re-mixing for 60 seconds to ensure a total mixing time of 3 minutes.

The dry mixture was mixed with an 8 % aqueous solution of an organic multifunctional additive. To ensure complete dispersion of the modifying component in the liquid phase, the swelling modifier was periodically mixed using a drill with a blade attachment at a speed of no more than 450 rpm. In order to eliminate the influence of non-hydrated particles of the organic multifunctional additive on the formation of defects in the hardened gypsum stone, the prepared gel was used as a binder for the dry mixture no earlier than 90 minutes after the start of preparation of the viscosity modifier solution.

The prepared solution mixture was applied to the surface of the concrete base plate, manufactured in accordance with the requirements of GOST R 58277–2018, using a spatula with a blade width of 10 mm in one pass, pressing the mixture and levelling the front surface of the specimens with a steel ruler. A silicone applicator was used to make specimens with a rib length of 50 mm, ensuring a 5 mm thick layer of mor-

tar mixture. The applicator was removed from the base plate while maintaining the properties of the mortar mixture. The outer edge was first cut along the applicator holes with a blade to prevent damage to the integrity of the manufactured specimens.

The base plate with test specimens was stored for 7 days in a room maintaining a temperature and relative humidity of $t = (22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ and $\varphi = (52 \pm 10) \%$, respectively. After the storage period, square steel stamps (50 mm edge length) were glued to the hardened specimens using a two-component epoxy resin-based adhesive. Before gluing the stamps, the surface of the test material was levelled by sanding the specimens with sandpaper, followed by dust removal. The adhesion pull-off test of the specimens from the concrete slab was carried out 24 hours after the stamps were glued using a portable testing machine for measuring the pull-off force (adhesion) HP 1000 Haftprüfsystem using a hydraulic power cylinder with a maximum measurable peel force of 9 kN at a load increase rate of 250 ± 50 N/s.

RESEARCH RESULTS

The results of research into material for ACP using an organic multifunctional additive established its effect on adhesion strength to concrete substrates and compatibility with a water repellent in the composition of hardened mortar (Fig. 1).

From the adhesion strength values obtained for a series of specimens, a decrease in the adhesion of the material to the concrete base from 0.53 to 0.35 MPa can be observed when a water-repellent additive is added together with a modifier to the dry mix. This phenomenon is confirmed by the mechanism of action of hydrophobic components, which involves chemical processes at the interface between the surface of the hardening mortar and the base, as well as inside microdefects in the concrete, with the formation of films that prevent further capillary suction of water from the mortar mixture, which is necessary for the formation of a physicochemical bond with the concrete [18, 19].

During a visual assessment of the nature of the detachment (Fig. 2), it was determined that specimens of hardened stone composition with the use of an organic



Fig. 2. Appearance of specimens for determining the adhesion strength of the material for ACP with a concrete base: *a* — before gluing the stamps; *b* — after tearing off a series of specimens with an organic modifying additive; *c* — after tearing off a series of specimens with an organic modifying additive and a water repellent

multifunctional additive provided 55.2 % cohesive failure and 44.8 % adhesive failure in a series of test specimens. At the same time, a series of specimens made using a combination of a modifying component and a water repellent has a proportion of the surface of the tested solution with destruction of the base material equal to 25.3 %.

This change in the nature of separation from the concrete surface when a water repellent is included in the mortar mixture can be explained by the assumption that many types of additives from this group have a plasticizing effect, which increases the penetrating ability of the mortar mixture, filling microdefects and capillary pores in the concrete base [20, 21]. This assumption is also confirmed by the improved workability of the mortar mixture and the ease of mixing it in the mixer bowl.

CONCLUSION AND DISCUSSION

The possibility of combining an organic rheological modifier and a water repellent to ensure the adhesive

strength of a mortar mixture for 3D printing on a composite gypsum binder with an optimal ratio of components for interlayer adhesion has been substantiated.

It has been established that the introduction of a water repellent together with a modifying additive contributes to a decrease in adhesive strength to a 34.2 % decrease in adhesive strength. The study of the nature of the detachment of the hardened mortar from the concrete base indicates an increase in the penetrating ability of the mortar mixture, which is explained by the positive effect of the water repellent on improving the consistency of the mortar mixture and ensuring the cohesion of the system.

The relevance of future research lies in determining the optimal ratio of the water repellent and the multifunctional organic additive to ensure high adhesion strength of the hardened material and the penetrating ability of the mortar component.

REFERENCES

1. Inozemtcev A.S. Modern theory and practice of concrete technology for 3D printing in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):216-245. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.216-245. EDN PYHOAX. (rus.).
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Improving additive manufacturing for construction by increasing layer adhesion during long breaks in 3D printing. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2024; 1(67):127-134. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.13. EDN ULXEQB. (rus.).
3. Malaeb Z., Hachem H., Tourbah A., Maalouf T., El Zarwi N., Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2015; 6(6):14-22.
4. 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; 143:172-196. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
5. Goncharova J.Y., Drobotov A.V., Torubarov I.S., Volokhov M.A. A study of adhesion properties of surfaces for 3D-printing. *Cifra. Engineering*. 2024; 2(3). DOI: 10.60797/ENGIN.2024.3.3. EDN VQTFWM. (rus.).
6. Tolstoy A.D., Lesovik V.S., Novikov K.Iu. High endurance concretes on composite bindings with the use of man-made raw materials. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2016; 2(17):174-180. EDN WHAIQB. (rus.).
7. Mechtcherine V., Grafe J., Nerella V.N., Spaniol E., Hertel M., Füssel U. 3D-printed steel reinforcement for digital concrete construction — Manufacture, mechanical properties and bond behaviour. *Construction and Building Materials*. 2018; 179:125-137. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.202
8. Potapova E., Guseva T., Shchelchikov K., Fischer H.B. Mortar for 3D Printing Based on Gypsum Binders. *Materials Science Forum*. 2021; 1037:26-31. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1037.26
9. Suleymanova L., Malyukova M., Slepuhin A., Krushel'nickaya E., Tolstoy A. Influence of modifying agent with hydrophobization effect on increase of operational characteristics of vibropressed products. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 9:8-13. DOI: 10.34031/article_5da44154d5e735.90950690. EDN SHYITR. (rus.).
10. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Construction Technologies*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).
11. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. The control of rheological behaviour for 3d-printable building mixtures: experimental evaluation of “nano” tools prospects. *Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal*. 2019; 11(3):325-334. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-3-325-334. EDN NNOLZG. (rus.).
12. Poluektova V.A., Shapovalov N.A. Concrete chemicalization for digital printing: control of rheology and structure formation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020; 59-65. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_9
13. Slavcheva G.S., Shvedova M.A., Babenko D.S. Analysis and criteria assessment of rheological behavior of mixes for construction 3-D printing. *Construction Materials*. 2018; 12:34-40. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-766-12-34-40. EDN YROONV. (rus.).
14. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Kotova K.S., Shvedova M.A., Yurov P.Yu. Study of the strength regulation factors for the adhesive bonding “cement matrix – reinforcing fiber” in composites for 3D-build printing. *Nanotechnologies in Construction : a Scientific Internet-Journal*. 2023; 15(2):124-133. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-124-133. EDN HIGENO. (rus.).
15. Wang Y., Qiu L., Chen S., Liu Y. 3D concrete printing in air and under water: a comparative study on the buildability and interlayer adhesion. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134403. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134403
16. Stroganov V.F., Amelchenko M.O., Mukhametrakhimov R.Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increase in adhesion degree of sterol-acrylic coatings, modified with schungite-filler, for protection of building materials. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2021; 9:29-32. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-9-29-32. EDN SZNZHL. (rus.).
17. Tao Y., Yuan Y., Vantyghe G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings. *ACI Materials Journal*. 2021; 118(6). DOI: 10.14359/51733105
18. Suraev V.A. Hydrophobization. Theory and practice. *Construction Technologies*. 2002; 1(17):120-121. (rus.).
19. Yu M., Li P., Feng Y., Li Q., Sun W., Quan M. et al. Positive effect of polymeric silane-based water repellent agents on the durability of superhydrophobic fabrics. *Applied Surface Science*. 2018; 450:492-501. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.04.204
20. Bilyukevich A.V., Plisko T.V., Usosky V.V., Ovcharova A.A., Volkov V.V. Hydrophobization of polysulfone hollow fiber membranes. *Petroleum Chemistry*. 2018; 58(4):279-288. DOI: 10.1134/s0965544-118040035
21. Weger D., Baier D., Straßer A., Prottung S., Kränkel T., Bachmann A. et al. Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing — A First Feasibility Study. *RILEM Bookseries*. 2020; 978-987. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_95

Received August 27, 2025.

Adopted in revised form on September 15, 2025.

Approved for publication on September 24, 2025.

B I O N O T E S: **Ilya O. Rabbaa** — engineer of the Research Institute of Building Materials and Technologies, postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ilya_rabbaa@mail;

Oksana A. Larsen — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; LarsenOA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Ilya O. Rabbaa — study concept, material collection, sample preparation, testing, results processing, writing the original text, drawing up the conclusion.

Oksana A. Larsen — scientific supervision, study concept, scientific consulting, text revision, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.