

Совершенствование технологии аддитивного строительного производства регулированием продолжительности перерывов в процессе 3D-печати

Р.Х. Мухаметрахимов, Л.В. Зиганшина

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань

Аннотация: Приведены результаты экспериментальных исследований совершенствования аддитивного строительного производства за счет воздействия электрического поля (электродный прогрев) на печатаемые слои, что позволяет регулировать продолжительность технологического перерыва 3D-печати в широком временном интервале при обеспечении высоких показателей адгезии слоев, и, соответственно, качества готовой строительной продукции.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, 3D-печать, экструзия, технология, технологический перерыв, холодный шов, адгезия, сцепление, слой, бетон, качество.

Введение. Одним из недостатков аддитивного строительного производства является возникновение «холодных» швов между печатаемыми слоями при длительных технологических перерывах, что выражается в низких показателях прочности их сцепления [1–3]. В ранее выполненных нами исследованиях разработан способ 3D-печати бетоном с длительным технологическим перерывом [4], который позволяет осуществлять более продолжительные технологические перерывы (до 12 ч) без образования «холодных» швов и снижения адгезии слоев за счет устройства переходного слоя из модифицированной бетонной смеси.

Недостатком данного решения является медленная скорость твердения бетона переходного слоя. При необходимости сокращения продолжительности запланированного технологического перерыва длительные сроки схватывания и твердения модифицированного переходного слоя затрудняют процесс наращивания слоев после перерыва ввиду наличия «слабого звена» в незатвердевшем слоистом композите [5]. В этой связи задача совершенствования технологии аддитивного строительного

производства [6–8] регулированием продолжительности перерывов за счет интенсификации процессов твердения в процессе 3D-печати является весьма актуальной.

Известно, что интенсификация процессов твердения бетонных смесей возможна за счет увеличения температуры их твердения. Молодиным В.В., Ивановым Д.А., Навояном А.Х. в работах [9,10] показано, что температурные градиенты, возникающие при форсированной термообработке бетонной смеси, уложенной на контакте с промерзшим бетоном, приводят к более качественному сцеплению свежесуложенного и зрелого бетонов. Эффективность данного подхода показана при исследовании прочности сцепления слоев полистиролбетона ограждающей конструкции, напечатанной 3D-принтером [11].

Для регулирования продолжительности перерывов в процессе 3D-печати может оказаться эффективным способ совершенствования технологии аддитивного строительного производства, заключающийся в ускорении процессов структурообразования [12–14] и твердения слоев за счет воздействия на них электрического поля (электродный прогрев) [15,16].

Целью работы является обеспечение возможности регулирования продолжительности технологического перерыва в технологии 3D-печати путем увеличения средней скорости набора критической пластической прочности бетона переходного слоя при одновременном обеспечении высокого показателя адгезии слоев, исключающего образование холодных швов за счет электродного прогрева.

Объект исследований – напечатанный бетон, технологические параметры аддитивного процесса. Предмет исследований – пластическая прочность бетонной смеси, адгезия слоев, технологическая схема производства работ.

Материалы и методы исследований. 3D-печать осуществляли на строительном принтере АМТ S-6044. Исследования произведены с использованием мелкозернистых бетонных смесей (МЗБС) на основе портландцемента (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н, кварцевого песка с модулем крупности $M_k 3$ при соотношении Ц/П = 1/3, марки по подвижности Пк-3.

Базовый состав мелкозернистого бетона модифицировали полифункциональной комплексной добавкой [17] состав переходного слоя – полифункциональными комплексными добавками, включающими гидрофобизирующую добавку (ГД) на основе натрийметилсилантриола «ГКЖ-11Н», пластифицирующую добавку (ПД) на основе нафталинсульфоната натрия «MasterRheobuild 183», бинарную смесь метаксаолина и диатомита.

В качестве источника питания для воздействия на уложенные слои электрического поля использовали однофазный переносной сварочный трансформатор «Blue Weld Gamma 4.181». В качестве электродов использовали стальные стержни диаметром 6 мм, которые укладывали с шагом 100 – 300 мм на слой, уложенный ранее переходного слоя. Прогрев осуществляли до достижения бетонной смеси критической пластической прочности. В качестве критической пластической прочности в работе принято значение пластической прочности смеси, при достижении которой обеспечивается ее способность выдерживать вес вышележащих слоев без деформаций. По результатам ранее выполненных исследований установлено, что критическая прочность для рассматриваемых МЗБС составляет 3000 кПа.

Пластическую прочность бетонной смеси определяли в соответствии с требованиями ASTM C403 по сопротивлению смеси к проникновению плунжера пенетromетра C194. Среднюю скорость набора пластической прочности бетона определяли по отношению критической прочности (3000 кПа) к продолжительности ее набора с момента начала воздействия

электрического поля. Прочность сцепления напечатанных слоев определяли через 28 суток нормального твердения при помощи измерителя адгезии «ПСО-10МГ4С» методом нормального отрыва стальных дисков (пластин) в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018.

Разработанная принципиальная схема аддитивного строительного производства с регулируемой продолжительностью технологического перерыва приведена на рис. 1.

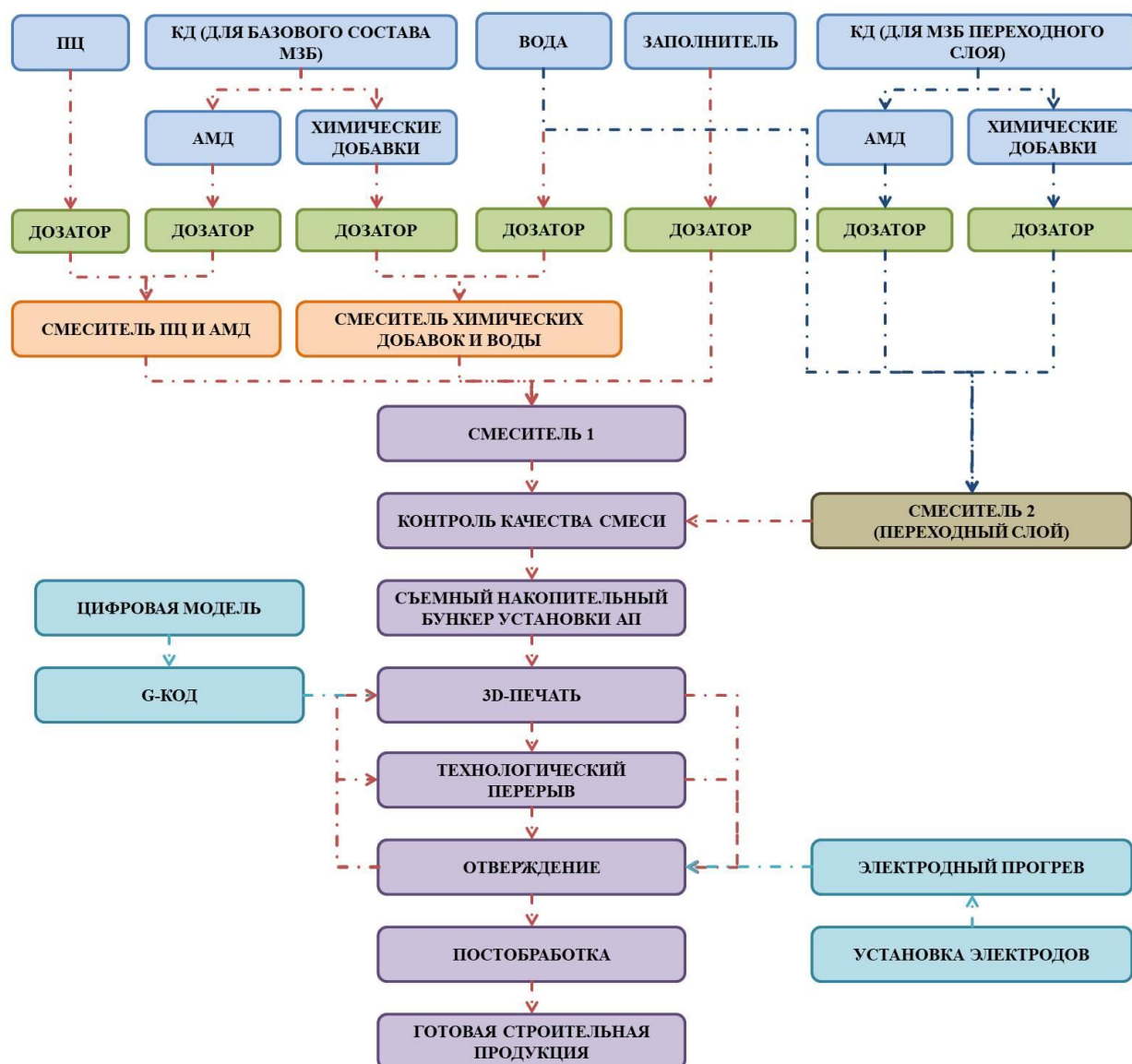


Рис. 1. – Принципиальная схема аддитивного строительного производства с регулируемой продолжительностью технологического перерыва

Результаты и обсуждение результатов. На первом этапе изучено влияние электродного прогрева на среднюю скорость набора пластической прочности МЗБС переходного слоя (таблица 1).

Таблица №1

Средняя скорость набора пластической прочности МЗБС переходного слоя, модифицированных разработанными комплексными добавками

№ добавки	Вид добавки	Содержание, % от массы вяжущего	Средняя скорость набора пластической прочности бетонной смеси переходного слоя, кПа/мин	
			без электродного прогрева	при электродном прогреве
КД1-П	Метакаолин	10	10,8	58,7
	Диатомит	10		
	MasterRheobuild 183	1		
	ГКЖ-11Н	0,1		
КД2-П	Метакаолин	10	8,7	54,5
	Диатомит	10		
	MasterRheobuild 183	1		
	ГКЖ-11Н	0,2		
КД3-П	Метакаолин	10	7,2	51,9
	Диатомит	10		
	MasterRheobuild 183	1		
	ГКЖ-11Н	0,3		
КД4-П	Метакаолин	10	6,7	49,1
	Диатомит	10		
	MasterRheobuild 183	1		
	ГКЖ-11Н	0,4		

Анализ экспериментальных данных, приведенных в таблице 1, позволил установить, что электродный прогрев МЗБС переходного слоя, модифицированного исследуемыми КД-П, оказывает существенное влияние на темпы набора его пластической прочности. Так, средняя скорость набора пластической прочности бетонной смеси переходного слоя, модифицированного разработанными полифункциональными КД1-П – КД4-П,

при электродном прогреве составляет 58,7 кПа/мин, 54,5 кПа/мин, 51,9 кПа/мин и 49,1 кПа/мин, что в 5,4, 6,3, 7,2 и 7,3 раза, соответственно, выше по сравнению с составами МЗБ, твердеющими без электродного прогрева. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предлагаемого технологического решения аддитивного производства по критерию регулирования продолжительности технологического перерыва в широком временном интервале.

На следующем этапе изучено влияние электродного прогрева на величину адгезии слоев базового состава и переходного слоя. Результаты исследований приведены на рис. 2.

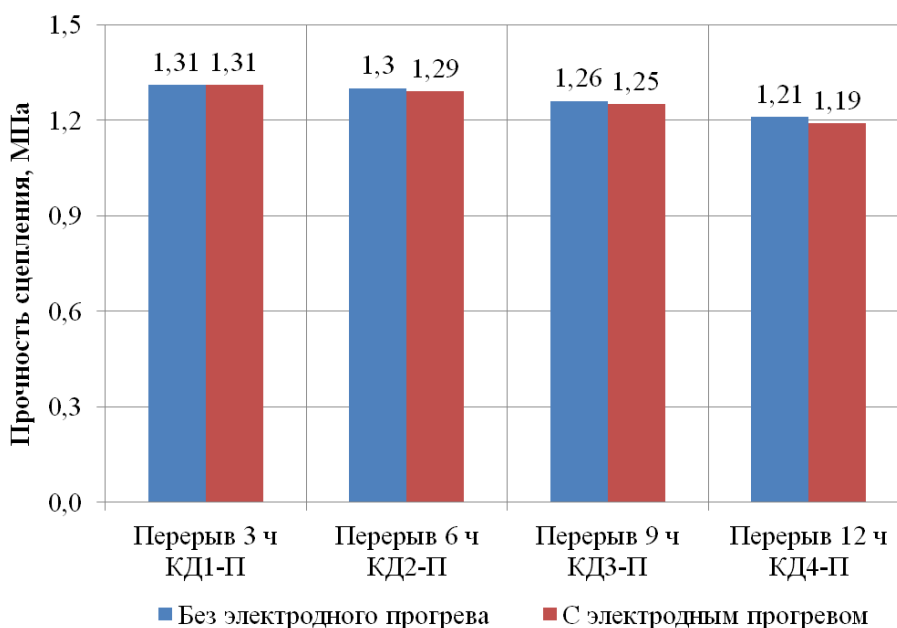


Рис. 2. – Влияние электродного прогрева на прочность сцепления слоев МЗБ

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии существенного влияния электродного прогрева на величину адгезии печатаемых слоев: наблюдается снижение прочности сцепления слоев на величину до 1,7%.

Выводы

1. Разработано технологическое решение в аддитивном строительном производстве, основанное на ускорении процессов структурообразования и

твердения переходного слоя (в 5,4-7,3 раза) за счет воздействия на него электрического поля при пропускании через него тока (электродный прогрев), что позволят регулировать продолжительность технологического перерыва в широком временном интервале при обеспечении высоких показателей адгезии переходного и базового слоев и, соответственно, качества готовой строительной продукции.

2. Предложенное технологическое решение позволит управлять кинетикой структурообразования и твердения бетонных слоев и регулировать продолжительность технологического перерыва в широком временном интервале.

Литература

1. Kuznetsov D.V., Klyuev S.V., Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Pudovkin A.N., Kobeleva E.V., Nedoseko I.V. Dry mixes on gypsum and mixed bases in the construction of low-rise residential buildings using 3D printing technology // Construction Materials and Products, 2023, № 6. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-5.

2. 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.

3. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process // Cement and Concrete Research, 2021, Vol. 143. P. 106386.

4. Мухаметрахимов Р. Х., Зиганшина Л.В. Способ 3D-печати бетоном с длительным технологическим перерывом. Патент на изобретение № 2794037 // Бюллетень № 11, опублик. 11.04.2023. 8 с.

5. Зиганшина, Л. В. Мелкозернистые бетоны в технологии аддитивного производства (3D-печати): специальность 2.1.5 Строительные материалы и

изделия: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Казань, 2022. 282 с.

6. Власова Т.А. Экологические аддитивные технологии // Инженерный вестник Дона, 2019, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6015.

7. Абрамян С.Г., Илиев А.Б. Современные аддитивные строительные технологии. Часть 1 // Инженерный вестник Дона, 2018, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755.

8. 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. pp. 37-49.

9. Молодин В.В., Иванов Д.А. Сцепление зрелого и твердеющего бетона, уложенного с термообработкой, в зимних условиях // Известия высших учебных заведений. Строительство, 2019, Т. 4, № 724. С. 82-93.

10. Навоян А.Х., Молодин В.В. Исследование сцепления твердеющего бетона со зрелым при замоноличивании стыков и ремонте конструкций // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), 2020, Т. 23, № 1 (75). С. 50-62.

11. Колесников Н.Л., Молодин В.В., Платошечкин О.С. Исследование прочности сцепления слоев полистиролбетона ограждающей конструкции, напечатанной 3D-принтером // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), 2022, Т. 25, № 3/4(85/86). С. 47-56.

12. Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Строганов В.Ф. Повышение характеристик дорожных цементогрунтов кремнийорганическими соединениями // Известия КГАСУ, 2023, № 4 (66). С. 301-309.

13. Строганов В.Ф., Амелеченко 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.

14. Rehman A.U., Birru B.M., Kim J.-H. Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties // Case Studies in Construction Materials, 2023, Vol. 18. p. e01955.

15. Mukhametrakhimov R.Kh, Garafiev A.M., Aleksandrova O.V, B.I. Bulgakov. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating // Construction materials and products, 2023, Vol. 6, № 6. pp. 1-16.

16. Коклюгина Л.А., Хидиятуллин И.И. Экспериментальное и имитационное исследование набора прочности бетона при бетонировании колонны в зимних условиях // Известия КГАСУ, 2020, № 2 (52). С. 65–72.

17. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганшина Л.В. Бетонная смесь на основе цемента для строительной 3D-печати. Патент на изобретение № 2775131 // Бюллетень №19, опубл. 28.06.2022. 10 с.

References

1. Kuznetsov D.V., Klyuev S.V., Ryazanov A.N., Sinitsin D.A., Pudovkin A.N., Kobeleva E.V., Nedoseko I.V. Construction Materials and Products. 2023. № 6. URL: doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-6-5.

2. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 119. pp. 132-140.

3. Weng Y., Li M., Zhang D., Tan M.J., Qian S. Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 143. pp. 106386.

4. Muhametrahimov R. Kh., Ziganshina L.V. Sposob 3D-pechati betonom s dlitel'nyim tekhnologicheskim pereryvom. [A method for 3D printing concrete with a long technological break]. Patent № 2794037. Byulleten' № 11, opubl. 11.04.2023. 8 p.

5. Ziganshina, L. V. Melkozernistye betony v tekhnologii additivnogo proizvodstva (3D-pechati) [Fine-grained concrete in additive manufacturing]:

special'nost' 2.1.5 Stroitel'nye materialy i izdeliya: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Kazan', 2022. 282 pp.

6. Vlasova T.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2019/6015.

7. Abramyan S.G., Iliev A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4755.

8. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 112. pp. 37-49.

9. Molodin V.V., Ivanov D.A. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo, 2019. Vol. 4. № 724. pp. 82-93.

10. Navoyan A.H., Molodin V.V. Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Sibstrin), 2020. Vol. 23. № 1 (75). pp. 50-62.

11. Kolesnikov N.L., Molodin V.V., Platoshechkin O.S. Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Sibstrin). 2022. Vol. 25. № 3/4(85/86). pp. 47-56.

12. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Stroganov V.F. Izvestiya KGASU. 2023. № 4 (66). pp. 301-309.

13. Stroganov V.F., Amel'chenko M.O., Muhametrahimov R. Kh., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Klei. Germetiki. Tekhnologii. 2021. № 9. pp. 29-32.

14. Rehman A.U., Birru B.M., Kim J.-H. Case Studies in Construction Materials. 2023. Vol. 18. pp. e01955.

15. Mukhametrakhimov R.Kh., Garafiev A.M., Aleksandrova O.V., B.I. Bulgakov. Construction materials and products. 2023. Vol. 6. № 6. pp. 1-16.

16. Koklyugina L.A., Hidiyatullin I.I. Izvestiya KGASU. 2020. № 2 (52). pp. 65-72.

17. Muhametrahimov R. Kh., Ziganshina L.V. Betonnaya smes' na osnove cementa dlya stroitel'noj 3D-pechati [Cement-based concrete mixture for 3DCP].



Patent № 2775131. Вуulleten' №19, opubl. 28.06.2022. 10 p.

Дата поступления: 25.02.2024

Дата публикации: 4.04.2024