

Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Ariel University (Ізраїль)
University North (Хорватія)
Politechnika Lubelska (Польща)
ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних
конструкцій»
Академія будівництва України
Українська академія архітектури
НВЦ «Екострой»
ТОВ «Стікон»



ЗБІРНИК ТЕЗ
міжнародної науково-технічної конференції
Структурутворення та руйнування
композиційних будівельних матеріалів
та конструкцій,
присвяченої 80-річчю заслуженого діяча науки і
техніки України, доктора технічних наук, професора
Вирового Валерія Миколайовича
23 квітня 2024 року



м. Одеса

ДРІБНОЗЕРНИСТИЙ БЕТОН ДЛЯ 3Д ДРУКУ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.

Мірошніченко С. В., к.т.н., доц., Рильський А. О. асп.,

Тютюкін С. В. асп.

Український державний університет залізничного транспорту

В теперішній час стає актуальним використання будівельних 3D принтерів для автоматизації процесу зведення будівель та споруд. Одним з таких способів зведення будівель, що активно розвивається в останні роки є технологія пошарового (адитивного) безопалубного формування за допомогою будівельних 3D-принтерів. Виробництво будівельних робіт таким чином в нашій країні поки що тільки набирає обертів, але має великі перспективи. За кордоном вже такі технології використовуються доволі довгий час і за ними будують не тільки цивільні будівлі, а ще й військові споруди. Одночасно з розвитком механізації та автоматизації виникає необхідність розробки матеріалів для такого будівництва. Для будівельних 3D-принтерів як «чорнила» використовуються бетонні розчини, які повинні мати ряд реологічних властивостей для забезпечення можливості пошарово нарощувати елементи конструкцій будівель. При цьому характеристики таких розчинів відрізняються від характеристик існуючих матеріалів.

Вибір матеріалів для 3Д друку буде залежати від ряду факторів. По-перше - це обладнання, яке буде цей матеріал готувати (бетоно-, розчинозмішувач), передавати до місця друку (розчинонасос), безпосередньо проводити друк (з екструдером або без), шланги, які з'єднують це обладнання між собою. По-друге - це призначення будівлі (конструкції), тобто вимоги безпосередньо до фізико-механічних властивостей матеріалів, корозійної стійкості, хімічної стійкості. По-третє - це умови проведення робіт, тобто в основному це температурно-вологісний стан в зоні друку при проведенні робіт.

Звичайно для друку необхідно в'язуче (цемент), заповнювач (пісок або суміш пісків) і вода. Теоретично, із подібного набору компонентів, можемо отримати матеріал для друку. Але цей матеріал необхідно приготувати із відповідними реологічними характеристиками. Тобто він повинен не втрачати структурної цілісності після виходу із друкувального пристрою. До цього його потрібно транспортувати за допомогою нагнітаючого насоса через шланги до друкувального пристрою, тобто він повинен бути достатньо рухливим. І головне, після друку і тверднення він повинен мати відповідні характеристики по ряду

параметрів. Для виконання таких функцій і передбачено введення добавок.

Вимоги до обладнання. Розчинонасос може використовуватися або поршневий або шнековий. Але до поршневих насосів є дуже суттєве обмеження. Існуючі насоси такого типу мають обмеження по рухливості (за проникненням стандартного конусу) – 7 см і вище. При настільки рухливій суміші складніше забезпечити необхідні фізико-механічні характеристики матеріалу на виході із друкувальної головки. При використанні шнекових насосів є можливість використання більш жорстких сумішей з можливістю використання заповнювача фракцією до 10 мм (можливо для деяких шнекових пар). Висота подачі розчину та дальність подачі розчину по горизонталі також буде залежати від типу використовуваних шнекових пар.

Відповідно до [1] добавки класифікують по основному ефекту впливу на властивості бетонної суміші і бетону. Виділяють 5 груп добавок, що регулюють властивості готових до використання бетонних та розчинних сумішей: 1 - пластифікуюча група; 2 – стабілізуючі; 3 - поризуюча група; 4 – що регулюють (скорочують або подовжують) строки; 5 - регулюють (скорочують або подовжують) термін зберігання початкової рухомості суміші. Крім того ще є добавки, що змінюють властивості бетонів і розчинів та добавки, що надають бетонам (розчинам) спеціальних властивостей.

Одні і ті ж добавки можуть відноситись до різних класів, залежно від мети, з якою вони вводяться в бетонну суміш, дозування і т.і.

У роботах [2] у якості домішок використовували пластифікатор, прискорювач твердіння і фібру. У роботі [3] додатково використовували прискорювач твердіння, а також доменний гранульований шлак. У роботі [4] розглянуто використання водостійких гіпсо-цементно-шлакових композицій. Для надання спеціальних властивостей [5] використовували магнезитовий заповнювач

Для визначення складу бетону для друку автори доповіді використовували правила та принципи побудови складів високоміцного, водонепроникного, довговічного бетону за рахунок щільного пакування частинок складових при оптимальних коефіцієнтах розсунення зерен піску та щебеню (гран відсіву) [6]. Ця методика підбору складу має доволі високий ефект при отриманні жорстких сумішей із низьким В/Ц.

За попередніми даними, на яких базувалися дослідження авторів, найбільший ефект дає використання наступних добавок. Суперпластифікатор С-3 або Master Silk - додається для зниження водоцементного відношення, прискорення строків схоплювання та

збільшення міцності у необхідний період. Хлорид кальцію ХК - це добавка прискорювач твердіння та яка підвищує ступінь гідrataції силікатів кальцію, тобто додатково підвищує міцність матеріалу. Полівінілацетатна емульсія ПВАЕ надає пластичність, підвищує адгезію сумішей до основ. Крохмаль модифікований КМ – стабілізуюча добавка. Фібра неметалева (дисперсне армування) – підвищення фізико-механічних властивостей бетону.

При подальших вишукуваннях від прискорювача твердіння відмовилися, в зв'язку із дуже швидким схоплюванням при температурах друку більше 25⁰С і в зв'язку з цим виникненням усадкових напруг в суміші при твердненні.

Для бетонних і залізобетонних конструкцій в нормативах передбачені класи умов експлуатації у залежності від характеристик навколишнього середовища. В залежності від цих даних вибирали необхідні характеристики сумішей. Для звичайних будівель (на які не чинять вплив додаткові корозійні чинники, такі як агресивні хімічні сполуки, морська вода, антиобморожувачі) - клас XF1. Для конструкцій, які знаходяться в ґрунті (якщо відсутні агресивні води) – клас XC1

За [7] Вимоги для бетону:

XF1 - клас C25/30, марка за морозостійкістю F75;

XC1- клас C12/15, марка за морозостійкістю не нормується

Враховуючі вимоги до матеріалу на всіх стадіях були прийняті наступні показники бетонної суміші та бетонів отримуваних з неї:

Рухливість суміші за стандартним конусом $6 \pm 0,5$ см;

Середня міцність на стиск для стін будівель не менше 40 МПа;

Водопоглинання за масою не більше 4%;

Марка за морозостійкістю не менше F75;

Для приготування суміші використовували обладнання ТОВ «Геополімер». Бетономішалка примусової дії загальним об'ємом 200 л. У якості нагнітаючого насоса використовували шнековий насос штукатурної станції із шнековою парою типу D6, яка по заявленим характеристикам може використовуватися із крупністю часток заповнювача до 3 мм. Подача розчину до друкувального пристрою відбувалася по шлангам із допустимим тиском 20 bar. Зразки для контролю фізико-механічних характеристик готувалися безпосередньо друкувальним пристроєм у формах 7,07x7,07x7,07 см, а також методом пошарового друку випробувального зразка шириною 40 мм, висотою 40 мм (товщина кожного шару 10 мм) і довжиною 1000 мм. Із випробувального зразка довжиною 1000 мм через 24 години вирізалися балки довжиною 160 мм, які в подальшому випробувалися на згин та стиск.

У якості матеріалів для бетону використовувався цемент ПЦ-400 та ПЦ-500 виробництва Кривий Ріг та суміш пісків із модулем крупності 1,4 (річний митий) та 2,3 (гран відсів). Дозування компонентів (у т.ч. домішок) проводили в ручну на один заміс, який складав приблизно 60 л.

Після випробувань були отримані наступні показники:

Об'ємна вага - 2100 ± 50 кг/м³;

Міцність кубиків - 500 ± 20 кг/см²;

Водопоглинання за масою - $1,5 \pm 0,1\%$;

Міцність при згині балок - 80 кг/см²;

Міцність половинок балок при стиску - 300 кг/см².

Література

1. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 (EN 934-2:2001, NEQ) Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України 2010.
2. Савицький М. В., Конопляник О. Ю., Мислицька А. О., Лясота О. В. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3d-друку будівельних конструкцій DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.64.622.
3. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю.Ю., Цементно-шлакові суміші для 3d принтеру DOI 10.48076/2413-9890.2021-102-02.
4. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Степасюк Ю. О., Марчук В. В., Ефективні будівельні розчини для 3d-принтера DOI: 10.48076/2413-9890.2020-101-03.
5. Karol Federowicz a , Mateusz Techman a , Szymon Skibicki a , Mehdi Chougan b , Ahmed M. ElKhayatt c,d , H.A. Saudi e , Jarosław Błyszko a , Mohamed Abd Elrahman f , Sang-Yeop Chung g,* , Pawel Sikora Development of 3D printed heavyweight concrete (3DPHWC) containing magnetite aggregate. Materials & Design 233 (2023) 112246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112246>.
6. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них : монография : в 3-х т. / Укр. гос. акад. ж.-д. трансп. ; под ред. проф. А. Н. Плугина. — К. : Наук. думка. Т. 3 / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин, С.В. Мирошніченко, Д [и др.], 2012. — 281 с.
7. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ. Мінрегіонбуд України 2011.

Довгань О. Д., Вировой В. М., Хлицов М. В., Довгань П. М. Інформаційні технології при вивченні структури будівельних композитів	52
Дудар І. Н., Яворовська О. В. Використання відходів від руйнувань у будівельній індустрії як стратегічний шлях до відновлення України	56
Ishakov I., Ribakov Y. Stress-strain model for compressed concrete without empirical coefficients	61
Клим А. Б., Бліхарський Я. З Відновлення несучої здатності залізобетонних балок з використанням Sika MONOTOP-4012	62
Kopiika N. S., Blikharskyi Y. Z. The use of CFRP materials for strengthening of RC beams with corrosion damages of rebar	67
Krivenko P., Rudenko I., Konstantinovskiy O., Kovalchuk A. Strength development of slag-containing cements: problems and decisions	71
Кровяков С. О., Ігнатенко А. В., Чистяков А. О. Властивості бетону з використанням вторинного щебеню з неоднорідним складом	75
Крутий Ю. С., Вакуленко В. В. про розробку методу розрахунку функціонально-градієнтних балок на пружній основі Вінклера	79
Луцкін Є. С., Шинкевич О. С., Ляшенко Т. В. Аналіз модифікованих багатокомпонентних систем з використанням чисельних методів	83
Мартинов В. І., Тайчан Д. С., Макарова С. С. Вплив твердої фази на властивості ніздрюватого бетону	86
Мірошниченко С. В., Рильський А. О., Тютюкін С. В. Дрібнозернистий бетон для 3D друку: проблеми та перспективи	88
Муригін М. А., Пługін А. А., Пługін Д. А., Лобяк О. В. Залізничні шпали з бетону, армованого композитною арматурою	92
Наджафов Е. Ф., Пługін Д. А., Пługін А. А., Лобяк О. В., Слепченко С. В. Опорні конструкції контактної мережі залізниць із бетону, армованого композитною арматурою	96
Неутов С. П., Єсванджія В. Ю. Несуча здатність та тріщиностійкість пошкодженої балки, підсиленої фібробетоном у стиснутій зоні	100