

УДК 666.97:691.3

В. С. МАТВЕЙЧИКОВА (ПС-22)

Научный руководитель – канд. техн. наук *А. А. ВАСИЛЬЕВ*

ГЕОПОЛИМЕРНЫЙ БЕТОН

Приведены составы и рассмотрена технология изготовления геополимерного бетона. Выполнен анализ прочности геополимерного бетона для различных составов и соотношений Na/Al и Si/Al. Показаны преимущества и недостатки геополимерного бетона. Приведены области применения геополимерного бетона.

Введение. Термин «геополимер» ввёл Жозеф Давидович. Он обозначает алюмосиликатные материалы, образующиеся при щелочной активации. Геополимерный бетон (ГПБ) – современная альтернатива портландцементному бетону (ПЦБ), где вместо цемента используется геополимер – щелочно-активированный материал с прочной алюмосиликатной структурой [1].

Основная часть. ГПБ считается экологичным, так как его производство не требует обжига и позволяет использовать промышленные отходы (зола-уноса, шлаки), снижая энергозатраты. Активация происходит с помощью щелочных растворов – гидроксидов и силикатов натрия или калия.

Геополимерный бетон изготавливается из зольной пыли (летучей золы), жидкого стекла, шлака, воды и гидроксида калия. Применение золы помогает решать экологические проблемы, а производство при низких температурах сводится к правильному смешиванию компонентов, что обеспечивает получение прочного монолита. Жидкое стекло повышает водостойкость бетона, выдерживает нагрев до 1200 °С и циклы замораживания. Летучая зола, измельчённая в порошок, при содержании до 75 % улучшает долговечность бетона.

Вариант состава геополимерного бетона для серийного выпуска [2] приведен в таблице 1.

Изготовление смеси заключается в последовательном смешивании сухих компонентов в прочной ёмкости и добавлении воды комнатной температуры. Раствор перемешивают до однородности, при этом начинается реакция с выделением тепла и пузырьков углекислого газа. При нагреве до 80 °С бетон твердеет за сутки, а при обычных условиях – за неделю, превращаясь в прочный монолит, пригодный для строительных работ. Исходные материалы: алюмосиликатный источник – зола-унос (класс F), шлак, метакралин.

Таблица 1 – Состав геополимерного бетона

Материал	Количество, кг/м ³
Шлак доменный гранулированный молотый	500
Добавка щелочная комплексная Омега-Актив	25
Портландцемент ЦЕМ 0 42,5	0–20
Песок строительный (модуль крупности 2.0–2,5) мм	700
Щебень фракции 5–20 мм	1100
Вода	150

Важны аморфность, состав и тонкость помола; щелочной активатор – растворы NaOH и/или силиката натрия. Концентрация и соотношение влияют на скорость реакции и свойства; заполнители – песок и щебень (чистые, требуемой фракции); добавки – суперпластификаторы (щелочестойкие), ускорители твердения, волокна.

Основные этапы производства : приготовление активатора – растворение NaOH и смешивание с силикатом натрия; приготовление смеси – сухое перемешивание алумосиликатного источника, заполнителей и добавок; добавление щелочного активатора и перемешивание до однородной консистенции; формование и уплотнение – укладка в формы, вибрирование (при необходимости); твердение проводится при повышенной температуре (20–80 °С) и высокой влажности для ускорения геополимеризации. Возможны пропаривание или автоклавная обработка; уход – защита от высыхания в начальный период.

Свойства геополимерного бетона: прочность на сжатие 20–100 МПа и выше, часто превосходит ПЦБ. Зависит от типа сырья (зола-унос, шлак, метакраолин), концентрации активатора, соотношения Si/Al и условий твердения (таблицы 2 и 3); прочность на изгиб и растяжение составляет 10–20 % от прочности на сжатие.

Таблица 2 – Прочность на сжатие ГПБ для различных соотношений компонентов, %

Компонент	Геополимерная бетонная смесь для литья	Геополимерная бетонная смесь для 3D-печати		
Алюминатно-кальциевый цемент	–	–	4	–
Активатор	10	15	19	0,3
Летучая зола + измельченный доменный шлак	25	4	–	37
Метакраолин	–	9	13	–
Мелкий заполнитель	13	19	13	17
Крупный заполнитель	45	48	43	30
Вода	6	4	6	16
Полипропиленовое волокно	0,14	0,14	0,14	0,14
Прочность на сжатие, МПа	25	37	30	14

Таблица 3 – Прочность на сжатие ГПБ для различных соотношений Na/Al и Si/Al

№ смеси	Na/Al	Si/Al	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте 7 / 28 суток		Прочность на изгиб, МПа, в возрасте 28 суток
1	1,34	2,59	27,9	41,4	4,85
2	1,35	2,91	32,9	44,5	4,92
3	1,36	3,23	35,6	47,3	4,98
4	1,66	3,77	37,9	49,5	5,03
5	1,38	3,90	38,5	51,4	5,09
6	1,41	3,08	37,6	50,8	4,98
7	1,49	3,68	38,2	52,4	4,95
8	1,99	4,68	41,6	54,7	4,92
9	1,69	4,95	34,2	47,5	4,88

Прочность существенно повышается при введении волокон (стальных, полимерных); модуль упругости сопоставим или выше, чем у ПЦБ; химическая стойкость – высокая устойчивость к кислотам, сульфатам и хлоридам благодаря плотной неорганической матрице и отсутствию $\text{Ca}(\text{OH})_2$; истираемость сопоставима или ниже, чем у ПЦБ; огнестойкость высокая, материал негорюч и не выделяет токсичных газов при нагреве; усадка ниже, чем у ПЦБ, что снижает риск трещинообразования; водопоглощение низкое, обусловлено плотной микроструктурой геополимерной матрицы [1].

Преимущества ГПБ перед ПЦБ:

- экологические – снижение выбросов CO_2 на 40–90 % (отсутствие обжига); утилизация промышленных отходов (зола-унос, шлак); меньшее энергопотребление при производстве;

- эксплуатационные – высокая стойкость к агрессивным средам (кислотам, сульфатам, хлоридам); отличная огнестойкость (сохранение прочности до 1000 °С); низкая усадка и высокая морозостойкость; лучшая защита стальной арматуры от коррозии;

- сопоставимая или более высокая прочность на сжатие; возможность повышения прочности на растяжение за счет армирования волокнами; повышенная ударная вязкость; быстрое твердение (сокращение сроков строительства).

Однако существуют и ограничения: более высокая стоимость щелочных активаторов; сложность технологии производства; недостаточная стандартизация и нормативная база; ограниченный практический опыт применения.

Область применения геополимерного бетона:

- инфраструктурное строительство – дорожные покрытия, мосты, аэродромы (стойкость к солям, топливу); железнодорожные шпалы (прочность, вибростойкость); туннели и водопропускные сооружения;
- гидротехнические сооружения – морские конструкции (волнорезы, пирсы) – устойчивость к морской воде; дамбы, плотины, каналы – стойкость к эрозии и фильтрации;
- промышленное строительство – промышленные полы (химическая стойкость); фундаменты под оборудование; резервуары для химических веществ; дымовые трубы (огнестойкость);
- гражданское строительство – фундаменты, стены, перекрытия; сборные конструкции; сейсмостойкое строительство;
- специальное применение – ремонт и восстановление конструкций; 3D-печать в строительстве; радиационная защита; геотермальные системы.

Заключение. Уникальные свойства ГПБ (химическая стойкость, долговечность, экологичность) определяют его перспективность для объектов с повышенными требованиями к эксплуатационным характеристикам. ГПБ особенно актуален в регионах с большим объёмом промышленных отходов и строгими экологическими нормами.

Область применения геополимерного бетона (ГПБ) расширяется по мере проведения исследований и разработки новых составов. Его уникальные свойства делают его подходящим для различных строительных задач, особенно в тех случаях, когда важна долговечность, устойчивость к агрессивным средам и экологичность. Развитие технологий поможет ему занять важное место среди основных строительных материалов будущего.

Геополимерный бетон – современный строительный материал, экологичная и надёжная альтернатива ПЦБ. Его создание связано с необходимостью снизить вредное влияние строительства на природу и повысить долговечность конструкций. Это не просто замена ПЦБ, а шаг к устойчивому строительству, сочетающий прочность, экологичность и переработку отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Геополимерный бетон с использованием многотоннажных техногенных отходов / Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен [и др.] // Строительство: наука и образование. – 2011. – Т. 11, вып. 2. – С 17–37.

2 ТУ 5870-006-30993911-2014. Геополимерные бетоны. Технические условия. – Введ. 20.05.2014 ООО Инновационный технопарк «Арх и Строй». – 23 с. – URL: <https://betonzone.com/wp-content/uploads/2015/06/ty5870-006-30993911-2014.pdf> (дата обращения: 07.04.2026).

Получено 08.05.2026