

УДК 621.311

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ВОЛОКОН В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

USE OF MAN-MADE FIBRES IN THE BUILDING PRODUCTS MANUFACTURE

В. В. Опекунов,

профессор кафедры БНТУ, д-р техн. наук, профессор

Ю. В. Скорина,

зам. директора ООО «НАНОКОНТ»

Ю. Д. Самуйлов,

магистрант БНТУ

Приведены данные о физико-механических и деформативных свойствах цементного газобетона и гипсобетона с добавкой техногенного волокна в виде использованной кордной ткани. Показано, что происходит не только утилизация техногенного волокна, но и возрастают прочность при сжатии и прочность при изгибе строительных композиционных материалов. Использованная кордная ткань может быть применена при монолитном бетонировании стен из цементного газобетона и при изготовлении гипсовых плит для перегородок.

Presents data on the physico-mechanical and the deformation properties of aerated concrete cement and concrete of gypsum binder with the addition of the manmade fibers in the form of a used cord fabric. It is shown, that involves not only the recycling of technogenic fiber, but also increased compressive strength and Flexural strength of the construction of composite materials. Used cord fabric can be applied for monolithic concrete walls made of aerated concrete cement and in the manufacture of gypsum boards for partitions.

В БНТУ при творческом участии других научных организаций и промышленных предприятий проводятся работы по получению различных строительных материалов с улучшенными физико-техническими свойствами. В частности, проводятся поисковые исследования, целью которых является разработка рецептур формовочных смесей с техногенными волокнистыми наполнителями (ТВН) для производства изделий из цементных ячеистых бетонов неавтоклавного твердения (ЦЯБНТ) средней плотностью (ρ) в диапазоне $\rho = 300\text{--}600 \text{ кг/м}^3$ и гипсобетонов.

Способ повышения прочности (R) и уменьшения деформативных свойств ячеистых бетонов путем введения в сырьевые смеси волокнистых наполнителей (ВН; полимерных волокон, волластонита, асбеста и др.) изложен в ТКП 5.03-

137-2009 «Изделия из ячеистого бетона. Правила изготовления». Вместе с тем необходима разработка конкретных способов производства ячеистых бетонов, связанных с применением прежде всего ТВН, которые по ряду полезных свойств не уступают кондиционным волокнам. В настоящее время на заводах Беларуси накоплены сотни тонн невостребованных ТВН различного происхождения.

Утилизация техногенных волокон в производстве строительных композиционных материалов

Уровень прочности ЦЯБНТ может быть существенно повышен путем использования различных долговечных ВН. Наличие ВН с необходимой прочностью адгезионного контакта ВН — гидросиликатная матрица ($R_{\text{ВН}}$) способ-

ствуется и уменьшению усадки (U) ячеистого бетона [1, 2].

Как правило, к ВН предъявляется требование по параметру «щелочестойкость», так как формовочные смеси на основе цементов имеют исходный уровень $pH \geq 12,5$ (при $pH < 11,8$ (по некоторым данным при $pH < 8,5$) начинается коррозия стальной арматуры). Имеющиеся данные о щелочестойкости (частный параметр долговечности) полимерных и неорганических ВН противоречивы и требуют дополнительного экспериментального исследования, например при $pH = 8-13$. Техническая трудность состоит в моделировании среды эксплуатации ВН.

Прочность ячеистых бетонов зависит от множества факторов, в том числе от уровня эксплуатационной влажности (W), класса среды эксплуатации конструкций (L ; см. EN 1996-2. Еврокод 6 «Проектирование каменных конструкций. Часть 2. Проектирование, применение строительных материалов и выполнение каменной кладки» или СТБ 1540), температуры, скорости возрастания нагрузки, деформаций усадки, ползучести и набухания, а также от степени однородности (гомогенности) формовочной смеси (D). Параметр D существенно зависит, например, от способа смешения компонентов (конструкции смесителя) и формования массива ячеистого бетона (литьевой, вибрационный, ударный).

В экспериментах по получению ЦЯБНТ в виде цементного газобетона (ЦГБ) использованы полимерные ТВН в виде рубленых отходов ПТК «Химволокно — Гродно Азот» (ТВН-1) и отходов искусственных волокон ОАО «БЕЛФА» (коммерческое название «КНОП»). Наличие в составе «КНОП» канекарона не должно сдерживать его рациональной утилизации, например путем дискретного распределения «КНОП» в малом количестве (до 2–3 мас. %) в матрице искусственных камней.

Вследствие действия ряда технических причин степень гидрофильности ТВН, а также прочность на разрыв ($R_{ТВН}$) не установлены. Трибохимический (приобретенный) знак заряда поверхности ТВН после приготовления формовочной газобетонной смеси не определен.

Микроскопические исследования показали, что волокна ТВН-1, как и соответствующий кондиционный ВН в виде нити, имеют гладкую поверхность, толщина по длине волокон практически не изменяется (рис. 1).



Рис. 1. Волокнистый наполнитель ТВН-1

При формовании образцов ЦГБ в виде кубов с ребрами длиной 100, 150, 300 мм и балочек $40 \times 40 \times 160$ мм применяли также и использованную кордную ткань (ИКТ) — техногенный продукт ТВН-2, получаемый при разделке (разрушении) пневматических шин на специальном оборудовании (рис. 2). В Беларуси работает несколько заводов, на которых извлекают ИКТ из различных шин. Продукт ИКТ накапливается.

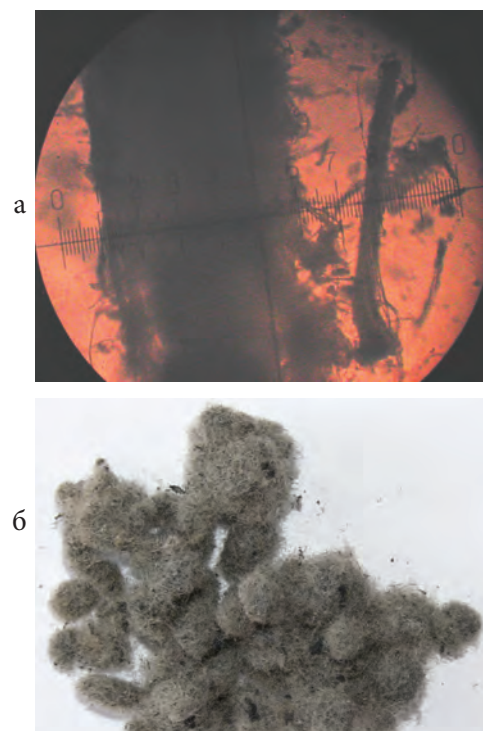


Рис. 2. Волокнистый наполнитель ТВН-2 (ИКТ):
а — в виде товарного продукта, полученного после разделки шин;
б — под микроскопом

Исходное полиамидное волокно (волокно для производства кордной ткани) имеет $R_{ВН} \geq 70$ МПа (рис. 3), относится к группе гидрофильных волокон (водопоглощение до 8 %).

Поверхностный слой элементарных волокон ИКТ (ТВН-2) несколько ослаблен (разрушен) вследствие механического воздействия при извлечении корда из шин (см. рис. 2, б). На участках длиной 30–40 мкм волокна ИКТ иногда содержат 1–2 остатка размером до 10 мкм вещества черного цвета (материал шины), прочно соединенного с волокном (микроанкеры). Отход ИКТ сохранил специальное покрытие «замасливателем», повышающее $R_{аТВН}$ (см. рис. 3).



Рис. 3. Кордная ткань с «замасливателем»

Исходя из имеющейся априорной информации, инженеры ООО «НАНОКОНТ» (г. Минск) разработали базовые составы ЦГБ на основе различных портландцементов (ПЦ; песчанистого ПЦ по ТУ ВУ 590118065.562 «Портландцемент песчанистый. Технические условия», ПЦ с гранитной миндобавкой по ТУ ВУ100649721.116-2010 «Портландцемент с минеральной добавкой из молотого гранитного отсева (опытная партия)» и бездобавочного ПЦ) и МЗ в виде молотого кварцевого песка (остаток на сите № 008 не более 20 %).

В формовочной смеси соотношение ПЦ (клинкерная часть) / МЗ равно 1 : 1. Расход ТВН — до 1,5 % от массы ПЦ. Распределение ТВН-1 (длина волокон до 2–3 мм) и ТВН-2 (длина волокон до 3–4 мм) в воде затворения при обычных режимах перемешивания (смешение компонентов с помощью смесителя с оборотами вала не

менее 100 мин⁻¹) равномерное, без использования поверхностно-активных веществ (ПАВ). Гидрофобный «КНОП» (длина волокон до 4–5 мм; вещественный состав не установлен) без ПАВ в воде равномерно не распределяется.

Формование образцов ЦГБ с добавкой ТВН и оценку основных физико-технических свойств бетонов выполняли в научно-исследовательской и испытательной лаборатории бетонов и строительных материалов (НИИЛ БиСМ) БНТУ.

Испытания образцов в «возрасте» 28 суток твердения в атмосферных условиях по ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» показали, что при $\rho = 365\text{--}375$ кг/м³ у образцов ЦГБ, содержащих ТВН в виде «КНОП» и ТВН-1, имеет место прирост прочности при сжатии ($\Delta R_{сж.}$) до 20 %. При этом контрольный ЦГБ имел прочность при сжатии $R_{сж.} = 1,0$ МПа. При $\rho = 400\text{--}420$ кг/м³ усадка при высыхании с $U = 2,6\text{--}3,0$ мм/м (контрольный образец ЦГБ) снизилась до $U = 1,1$ мм/м (образцы ЦГБ с ТВН).

Наличие ТВН в указанном количестве не уменьшает теплопроводность ЦГБ: у сухих образцов-плит размерами 250×250×30 мм из ЦГБ с ТВН при $\rho = 400\text{--}420$ кг/м³ коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,11$ Вт/(м·К), что соответствует теплопроводности бетона контрольных образцов.

Установлено, что в заданном диапазоне средней плотности наилучшими физико-техническими свойствами в «возрасте» 28 суток обладает ЦГБ с отходом ТВН-2 (ИКТ). При $\rho = 420\text{--}425$ кг/м³ у образцов ЦГБ, содержащих ТВН-2, прирост прочности при сжатии составляет до 35–40 %, $U = 1,0$ мм/м, морозостойкость — F 25.

Предварительный вывод об уровне параметра $R_{аТВН}$ (прочности адгезионного контакта «ТВН — гидросиликатная матрица») сделан на основании визуального анализа поверхностей, по которым произошло разрушение образцов ЦГБ при их испытании на прочность при сжатии в «возрасте» 28 суток. Установлено, что свежесформованная поверхность ЦГБ содержит небольшое количество видимых волокон ТВН-2 (на сколе образцов просматриваются единичные элементарные волокна ИКТ). В «возрасте» цементного камня 28 суток (при этом набор прочности ЦГБ продолжается) волокна ИКТ, несколько ослабленные вследствие их примене-

ния в составе материала шин, имеют достаточный уровень $R_{атвн}$.

Другие волокна (ТВН-1 и «КНОП») длиной до 1 мм после испытаний видны невооруженным глазом в большем количестве, чем волокна ИКТ. Возможно, что в процессе нагружения образца ЦГБ волокна ТВН-1 и «КНОП» дополнительно вытягиваются с последующим разрывом или без сопротивления вследствие низкого уровня значений $R_{атвн}$ извлекаются из цементного камня без разрыва. Механизм разрушения ТВН при нагружении ЦГБ зависит от множества факторов, в том числе и от соотношения между прочностью гидросиликатной матрицы $R_{атвн}$ и $R_{ТВН}$.

С применением съемной опалубки была выполнена экспериментальная заливка фрагмента стены $3,2 \times 1,0 \text{ м}^2$ толщиной 0,4 м. Послойно заливали газобетонные смеси, содержащие «КНОП» и ТВН-2. Для монолитного бетонирования был использован комплект мобильного оборудования (КМО), разработанный инженерами ООО «НАНОКОНТ», включающий два сблорированных смесителя-активатора с общим рабочим объемом смесительной емкости $2 \times 0,4 \text{ м}^3$ (мощность электродвигателей $2 \times 1,5 \text{ кВт}$), перистальтический насос производительностью 5–12 $\text{м}^3/\text{ч}$, гибкие полимерные трубопроводы диаметром 50 мм и пульт управления (рис. 4).



Рис. 4. Оборудование из состава КМО

Параллельно с заливкой в опалубку ту же формовочную смесь заливали в формы для получения образцов-кубов из ЦГБ. Согласно СТБ 1544, параметр L (среда проведения экспериментов и эксплуатации конструкции) имел уровень X0 или XF1 (среда без признаков агрессии — наружные стены, ежесезонно подверженные действию дождя и мороза; по EN 1996-2. Еврокод 6 — MX2).

В настоящее время выполняются натурные исследования деформаций набухания и ползучести ЦГБ возведенной стены в процессе достижения параметром W уровня равновесной влажности 5–6 %. Начаты работы по оценке коррозионной стойкости добавки ТВН-2 при экспериментальной эксплуатации фрагмента монолитной стены из ЦГБ без фасадной отделки.

Техногенный продукт ИКТ может быть использован также и при изготовлении, например, сборных гипсовых изделий — плит для перегородок (плиты «Про-Монта», DIN 18163; ТУ 5742-001-56798576-2004 «Плиты гипсовые пазогребневые для стен и перегородок») [2].

Добавку ИКТ вводили в количестве 0,93 % от массы гипсовой смеси (1,5 % от массы гипсового вяжущего). Результаты испытаний образцов-балочек размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$ из гипсовой смеси нормальной консистенции (влажность формовочной смеси 60 %) представлены в таблице.

В гипсовых смесях $pH = 6,5-7,0$ (нормальная среда эксплуатации для ИКТ). Исходная общая влажность формовочной смеси $W = V/G = 0,6$. Через 2 часа твердения при температуре $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ содержание физически связанной воды в гипсовом камне с ИКТ уменьшилось на 2–3 % и составило примерно 39 % (содержание гидратной воды в гипсовом камне — 18,6 %).

Прочность и средняя плотность гипсового камня

Гипсовый камень	Прочность, МПа				ρ , кг/м ³	Разрушение образца
	$R_{сж.}$	$\Delta R_{сж.}$, %	$R_{изг.}$	$\Delta R_{изг.}$, %		
Через 2 ч твердения:						
без добавки ИКТ	4,87	–	2,88	–	1690	Хрупкое
с добавкой ИКТ	4,16	–14,6	2,91	+1,0	1607	Без распада на фрагменты
Сухой:						
без добавки ИКТ	5,90	–	3,00	–	1257	Хрупкое
с добавкой ИКТ	7,26	+23,0	4,20	+40,0	1175	Без распада на фрагменты

Существующее уменьшение значений $R_{сж.}$ гипсоволокнистого камня с общей влажностью $W = 57-58 \%$ через 2 ч твердения не показательно (более значимым параметром качества гипсобетона является прочность при изгибе ($R_{изг.}$)) и зафиксировано согласно действующей методике определения марочности гипсового вяжущего (см. таблицу). Положительные значения $\Delta R_{сж.}$ гипсового камня с ИКТ в указанной дозировке (1,5 % от массы гипсового вяжущего) начинаются уже при содержании физически связанной воды менее 23,8 % (интерполяция линейная) (рис. 5). При этом $\Delta R_{изг.}$ составляет уже 14,3 % (рис. 6). При увеличении дозировки ИКТ параметр $\Delta R_{сж.}$ будет иметь положительные значения [1].

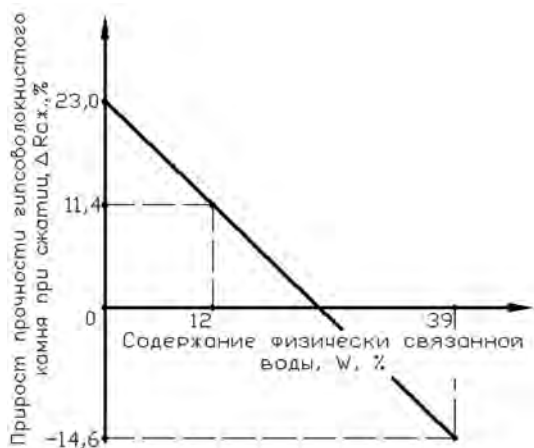


Рис. 5. Зависимость прироста прочности при сжатии гипсового камня с волокнами ТВН-2 (ИКТ) от содержания физически связанной воды

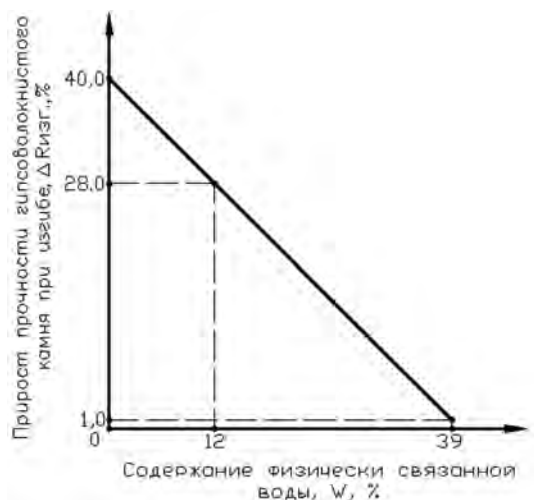


Рис. 6. Зависимость прироста прочности при изгибе гипсового камня с волокнами ТВН-2 (ИКТ) от содержания физически связанной воды

В процессе твердения гипсобетонные изделия увеличиваются в объеме на 0,5–0,8 %. По мере сушки гипсоволокнистого изделия волокно «запрессовывается» в гипсовый камень, увеличивая $R_{атвн}$ и несущую способность изделия. Параметр $\Delta R_{сж.}$ сухого (не содержащего физически связанной воды) гипсового камня за счет введения добавки ИКТ составляет 23 %, прирост прочности при изгибе ($\Delta R_{изг.}$) — 40 % (см. рис. 6).

Равновесная эксплуатационная влажность гипсовых изделий составляет 6–8 %. У промышленных гипсобетонных изделий стандартная отпускная влажность (содержание физически связанной воды) как правило 12 %. При этой влажности прочность гипсового камня с добавкой ИКТ возрастает на 11,4–28,0 % (см. рис. 5, 6).

Средняя плотность сухих образцов с ИКТ составляет $\rho = 1175 \text{ кг/м}^3$, что на 6,5 % меньше средней плотности контрольных образцов без ИКТ (см. таблицу). Введение добавки ИКТ практически не увеличивает длительность процесса сушки гипсоволокнистых изделий (водоудерживающая способность ИКТ незначительна).

Гипсоволокнистый камень с добавкой ИКТ разрушается по схеме, при которой образец, потерявший несущую способность, деформируется, но не распадается на отдельные фрагменты вследствие наличия микрофибр (рис. 7, 8). Данное обстоятельство существенно улучшает потребительские и эксплуатационные качества сборных и монолитных гипсоволокнистых литых и прессованных изделий.



Рис. 7. Образец сухого гипсового камня ($\rho = 1175 \text{ кг/м}^3$) с волокнами ТВН-2 (ИКТ) после испытаний на прочность



Рис. 8. Поверхность разрушения образца сухого гипсового камня ($\rho = 1175 \text{ кг/м}^3$) с волокнами ТВН-2 (ИКТ)

В настоящее время разрабатываются технологические приемы утилизации ИКТ в производстве изделий из ячеистого бетона автоклавного твердения (деструкция и потеря массы ИКТ начинается при температуре более +220 °С), шифера, асфальтобетона, гипсокартона и сухих строительных смесей.

На основании полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. Решение практических задач в области ресурсосбережения при массовом строительстве предполагает эффективное использование добавок в сырьевые смеси в виде техногенных волокнистых наполнителей. При этом происходит не только утилизация техногенных продуктов, но и улучшаются некоторые физико-технические свойства строительных композиционных материалов (возрастают прочность при изгибе, ударная вязкость и прочность при сжатии).

2. В деле организации производства качественных изделий, например из цементного газобетона с добавкой техногенных волокнистых наполнителей, главным звеном является нали-

чие качественного смесительного оборудования для обеспечения высокого уровня гомогенности формовочной смеси. Монолитные строительные конструкции из цементного газобетона с добавкой, например, использованной кордной ткани целесообразно изготавливать с использованием мобильного оборудования.

3. Гипсовые смеси с добавкой техногенных волокнистых наполнителей могут быть использованы для изготовления сборных (плит для перегородок и стеновых блоков) и монолитных гипсобетонных изделий с уменьшенной материалоемкостью и повышенной несущей способностью.

Литература:

1. Опекунов, В. В. Производство гипсоволокнистых плит для перегородок / В. В. Опекунов // Строительные конструкции: сб. науч. трудов. — К.: НИИСК. — 2000. — Вып. 52. — С. 329–333.
2. Опекунов, В. В. Пористые бетоны: монография / В. В. Опекунов. — Гродно: ГрГУ, 2011. — 193 с.