

Термические изменения сталефибробетонов с различными параметрами дисперсного армирования после воздействия высоких температур

Д.В. Зайцев

Московский государственный строительный университет

Аннотация: Работа посвящена исследованию термических деформаций и изменений свойств сталефибробетонов после нагревания их до высоких температур в связи с использованием панелей из сталефибробетонов в качестве несъемной опалубки сборно-монолитных конструкций атомных станций. Термические изменения сталефибробетонов изучали и в других работах. Однако полученные в этих работах результаты не соответствуют особенностям работы сталефибробетона в панелях несъемной опалубки. Не все основные термические изменения исследованы. В связи с этим в настоящей работе проведены испытания на образцах пластинах. Исследованы термические изменения после нагревания при температурах от 110 до 1100 °С массы, плотности, размеров, прочности при изгибе, скорости прохождения ультразвука и водонепроницаемости. Исследовали образцы 23 составов, изготовленных на основе цементно-песчаной матрицы с использованием пяти видов стальной фибры с объемным содержанием от 0,5% до 6%, а также образцы матрицы. Установлено, что после нагревания происходит уменьшение массы, и плотности, изменение размеров (в основном уменьшение после 110 – 600 °С и в основном увеличение после 800 – 1100 °С), изменение прочности при изгибе (в основном увеличение после 110 – 300 °С и уменьшение после 400 – 1100 °С), уменьшение скорости прохождения ультразвука и водонепроницаемости сталефибробетонов. Обнаружено, что зависимость термических деформаций и изменений свойств сталефибробетонов от температуры нагревания, объемного содержания и вида фибры имеет не монотонный и переменный вид при разных значениях этих факторов. Причем термические изменения фибробетонов не всегда соответствуют ожидаемым, исходя из теоретических представлений. Показаны причины этого явления. Отмечена необходимость провести в дальнейшем численный анализ полученных результатов для выявления истинного, не маскируемого другими процессами, влияния температуры, вида и объемного содержания фибры на термические изменения свойств сталефибробетонов после нагревания.

Ключевые слова: сталефибробетон, температурное воздействие, изменение массы, изменение скорости ультразвука, изменение водонепроницаемости, изменение прочности.

Введение

Сталефибробетоны, как материалы, дисперсно армированные волокнами (фиброй), отличаются от бетонов повышенными механическими и физическими свойствами, особенно прочностью при сжатии, растяжении и изгибе [1–3], поэтому являются перспективными строительными материалами.

В связи с этим, при возведении сборно-монолитных конструкций объектов атомной энергетики в качестве несущих элементов несъемной опалубки стали применять панели из сталефибробетона – фибробетона на основе цементно-песчаной матрицы, армированной стальными волокнами [4, 5].

К материалам железобетонных конструкций объектов атомной энергетики предъявляют ряд дополнительных требований по плотности, прочности, усадке, воздухо- и водонепроницаемости, а также по жаростойкости, так как на таких объектах конструкции из бетона могут подвергаться не только радиационному, но термическому воздействию. В связи с этим вопросы термических деформаций и изменения свойств сталефибробетонов имеют значительную важность.

Термические изменения сталефибробетонов исследовали во многих работах, после температур до 400 °С [6-8], после воздействия температур в диапазоне от 400 до 800 °С [9-11], после прогрева до 1100 °С [12-14]. Однако ранее все испытания сталефибробетона производились на образцах- кубиках или образцах-цилиндрах и в основном не в достаточно широком диапазоне температур. Исследовали в основном изменение прочности и главным образом прочности при сжатии. Полученные в этих работах результаты не соответствуют особенностям работы сталефибробетона в панелях несъемной опалубки. В связи с этим потребовалось провести испытания на образцах - пластинах, исследовать термические деформации, изменения прочности при изгибе и другие свойства.

Такие исследования были проведены с участием автора настоящей работы. Часть результатов были опубликованы соавторами или совместно с ними, например, в работах [15, 16]. Однако были опубликованы лишь предварительные результаты исследований с использованием неоптимизированной матрицы. В связи с этим в настоящей работе на правах

участника этих экспериментальных исследований приводятся окончательные результаты исследований термических изменений сталефибробетонов на основе оптимальной (улучшенной) матрицы.

Методика исследования

Для изготовления образцов фибробетонов использовали оптимизированную цементно-песчаную матрицу на основе портландцемента ЦЕМ 52.5 ОАО «Холсим» Коломенского завода, песка кварцевого люберецкого карьера, микронаполнителя – микрокремнезема МК-85 Новолипецкого металлургического комбината, гиперпластификатора Sika 5-800 (ГП) ООО «Зика» г. Лобня, а также пять разных видов стальной фибры, различающейся диаметром, длиной и видом анкерующей части волокон.

Технологический состав цементно-песчаной матрицы представлен в табл. 1. Характеристики использованной фибры приведены в табл. 2. На основании принятой матрицы были изготовлены образцы из сталефибробетонов 23 различных составов с объемным содержанием каждой (кроме фибры ФСПА 30*0,3) стальной фибры 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 3 % и 6 %, а также матрицы. Лишь образцы из фибробетонов с фиброй ФСПА 30*0,3 удалось изготовить только при объемном содержании фибры 0,5 %, 1 % и 1,5 %, так как при содержании волокон более 1,5 % в процессе перемешивания смеси волокна стальной фибры сцеплялись между собой, образуя «ежи».

Для испытаний использовали образцы в форме пластин с целью имитации панелей несъемной опалубки. Образцы имели размеры 135÷172 мм x 65÷80 мм x 17÷20 мм. Их изготавливали путем разрезки пластин размером 350 x 500 x 20 мм, изготовленных в специальной опалубке после твердения в нормальных условиях в течение 28 суток.

Для каждого процента армирования, каждого вида фибры и каждой температуры были подготовлены серии из трех образцов. Исследовали

воздействия в основном температур 110, 200, 400, 600, 800 и 1100 °С после нагревания образцов в муфельной печи.

Образцы нагревали до температуры испытания в течение нескольких часов и выдерживали при исследуемой температуре в течение 2 часов.

Таблица 1

Состав цементно-песчаной матрицы

Расход на 1 м ³				
цемент	Песок	Вода	микрокремнезем	Гиперпласти-фи катор Sika 5-800
725	1213	203	56,5	10,5

Таблица 2

Характеристика стальной фибры

Вид фибры	Характеристика фибры	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мм	Нормативное сопротивление растяжению, МПа
ФСПВ 30×0.8,	Рубленая из проволоки волнистая	30	0,8	860
ФСПВ 15×0.3		15	0,3	2450
ФСП-А 30×0.3	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон	30	0,3	2650
Нарех 32×1.2	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон	32	1,2	600
ФСЛ 40×0.8	Резанная из стального листа переменного профиля	40	0,8	580

Образцы взвешивали перед установкой в муфельную печь и после извлечения из печи после ее остывания для определения изменения массы после температурного воздействия. При этом для исключения сорбирования образцами влаги из воздуха измерение массы образцов производили сразу после извлечения образца из печи, что позволяло зафиксировать истинную массу воды, испарившейся из матрицы.

Затем проводили измерение геометрических размеров образцов микрометром и по их изменению после нагревания по сравнению с размерами до нагревания определяли деформации (усадку).

На следующем этапе исследования определяли скорость прохождения через образцы ультразвука. При этом использовали поверхностный метод прозвучивания образцов с помощью прибора «Пульсар 2.2». Измерения производились в пяти точках на двух поверхностях образца.

Далее определяли водонепроницаемость образцов по ГОСТ 12730.5-84 приложение 4 «Ускоренный метод определения водонепроницаемости бетона по его воздухопроницаемости» прибором типа ВВ-2. Испытание проводили на 3-х образцах из каждой серии сталефибробетонов и матрицы при комнатной температуре и после нагревания.

На завершающем этапе определяли прочность на растяжение при изгибе. При этом образцы каждой серии испытывали по методу трехточечного изгиба пластины на прессе..

Результаты исследований и их обсуждение

Зависимость относительного уменьшения массы матрицы после нагревания от температуры нагревания приведены на рис. 1. Зависимость относительных уменьшений массы сталефибробетонов и их соотношения с уменьшением массы матрицы после нагревания до различных температур от содержания и вида стальной фибры, приведены на рис. 2.

Установлено, что после нагревания происходит снижение массы образцов матрицы и всех сталефибробетонов. Очевидно, что это вызвано удалением воды из цементного камня матрицы. Степень снижения массы постепенно увеличивается с ростом температуры и достигает после 1100 °С 11,8 % у матрицы (рис. 1) и 10-12 % (рис. 2) у сталефибробетонов.

Снижение массы сталефибробетонов связано в основном с выделением воды из его цементно-песчаной матрицы. В связи с этим изменение массы

сталефибробетонов должно снижаться с увеличением объемного содержания фибры и составлять при плотности матрицы около 2300 кг/м^3 и плотности фибры 7800 кг/м^3 от 0,98 (при объемном содержании фибры 0,5%) до 0,80 (при объемном содержании фибры 6 %) от изменения массы матрицы.

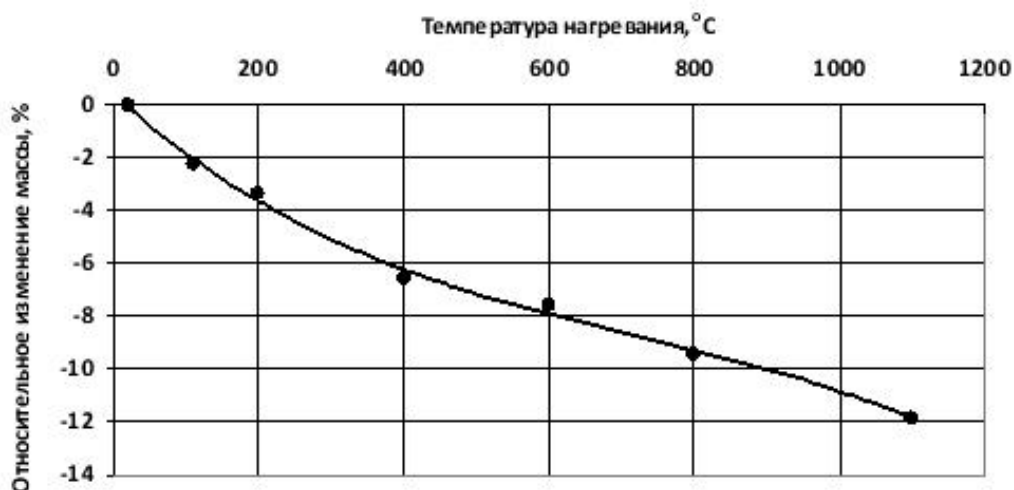


Рис. 1. Зависимость относительного уменьшения массы матрицы после нагрева от температуры нагрева

Фактическое уменьшение массы сталефибробетонов происходит и на меньшую и на большую величину, чем указано выше и составляет от 0,2 до 1,4 от изменения массы матрицы. Причем монотонной закономерности влияния объемного содержания и вида фибры не наблюдается.

По-видимому, наблюдаемые расхождения связаны с влиянием фибры на структуру и пористость матрицы сталефибробетона, так как ранее в работе [17] было показано, что в большинстве случаев фактическая расчетная плотность цементно-песчаной матрицы в составе сталефибробетона уменьшается с увеличением объемного содержания фибры из-за ее разуплотнения. В дальнейшем необходимо провести численный анализ зависимости изменений массы после нагрева от фактической плотности матрицы в составе сталефибробетона.

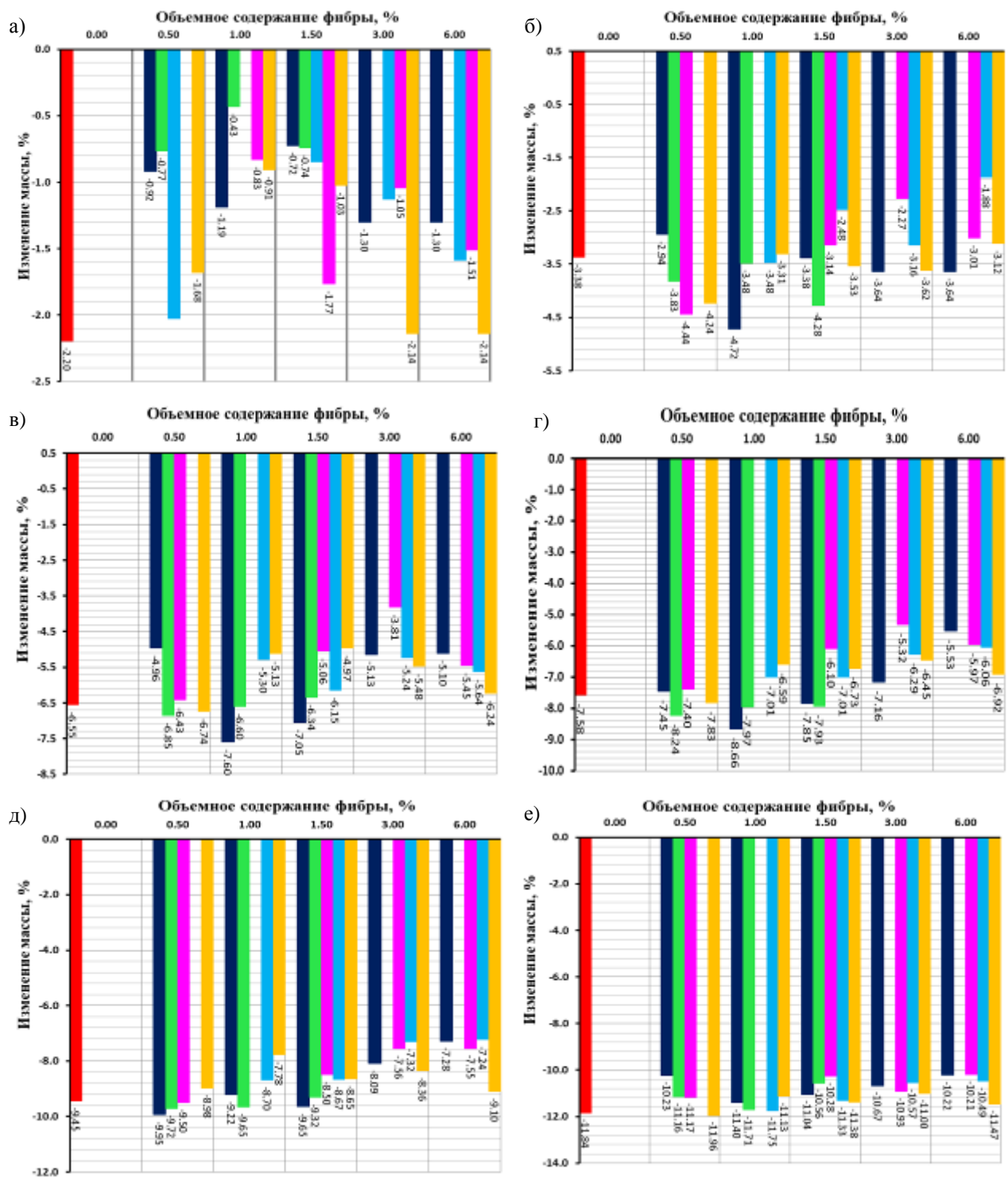


Рис. 2. Зависимость относительных уменьшений массы сталефибробетонов и их соотношения с уменьшением массы матрицы от содержания и вида фибры после нагревания до различных температур:

а - 110 оС, б - 200 °С, в - 400 °С, г - 600 °С, д - 800 °С, е - 1100 °С.

■ матрица ■ ФСПВ 15x0.3 ■ ФСПА 30x0.3 ■ ФСПВ 30x0.8 ■ ФСЛ 40x0.8 ■ Narex 32x1.2

Зависимость относительного изменения размеров (усадки) матрицы, после нагревания от температуры нагревания приведены на рис. 3. Зависимость относительного изменения размеров сталефибробетонов и их соотношения с изменением размеров матрицы после нагревания до различных температур от содержания и вида фибры приведены на рис. 4.

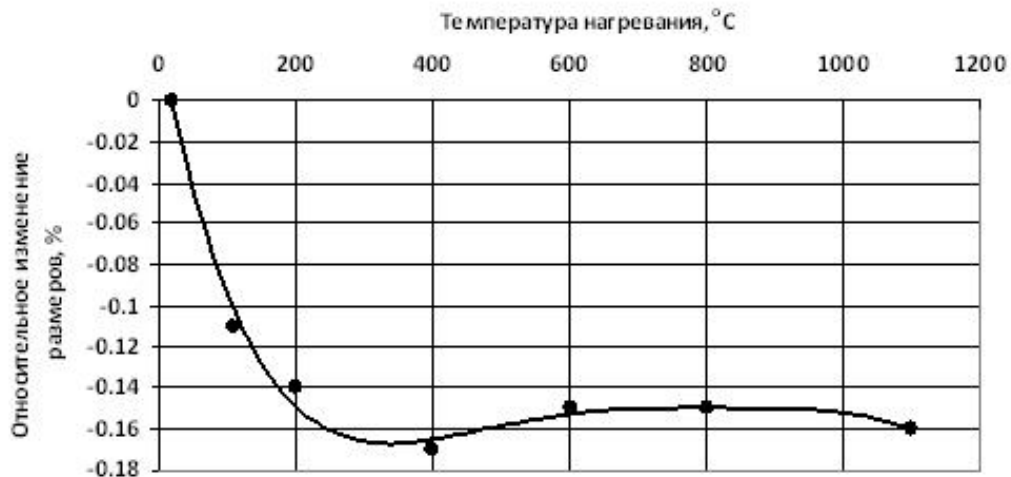


Рис. 3. Зависимость относительного уменьшения размеров матрицы без фибры после нагревания от температуры нагревания

Из рис. 3 видно, что у матрицы после нагревания при всех температурах происходит усадка. Усадка возрастает с ростом температуры нагревания в интервале температур от 110 °C (0,11%) до 200 °C (0,14%), незначительно (до 0,17%) увеличивается в интервале температур 200 – 400 °C и уменьшается до 0,15-0,16% в интервале температур 600 – 1100 °C. По данным [18] усадка цементного камня вследствие выделения воды, вызывающая усадку сталефибробетона, приблизительно линейно возрастает с увеличением температуры. В связи с этим уменьшение приращения усадки в интервале температур 200-400 °C и фактически прекращение роста и снижение усадки в интервале температур 400-1100 °C свидетельствует об образовании после нагревания в исследованной матрице трещин.

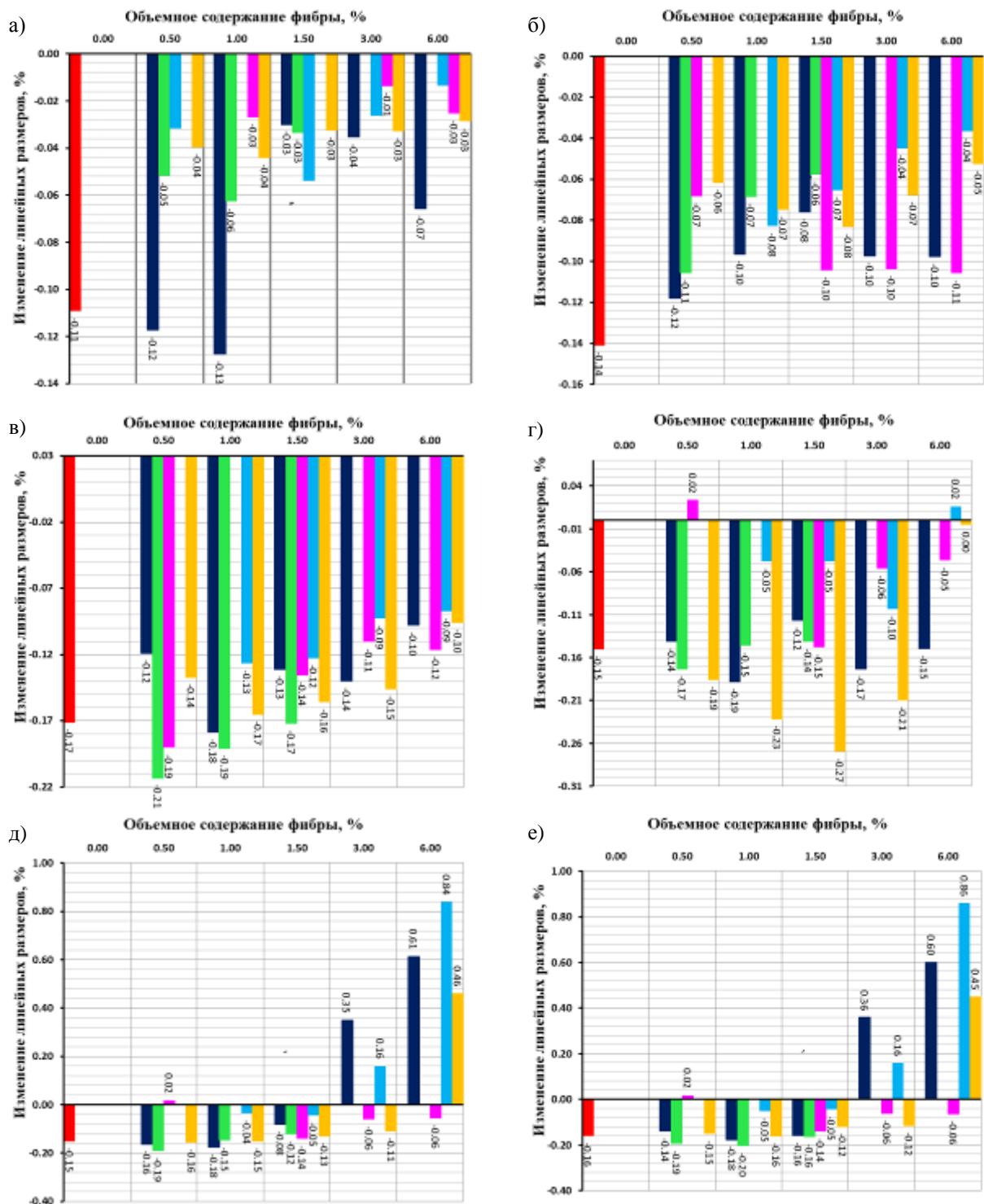


Рис. 4. Зависимость относительного изменения размеров сталефибробетонов и их соотношения с изменением размеров матрицы от содержания и вида фибры после нагревания до различных температур
а - 110 оС, б - 200 °С, в - 400 °С, г - 600 °С, д - 800 °С, е - 1100 °С.

■ матрица ■ ФСПВ 15x0.3 ■ ФСПА 30x0.3 ■ ФСПВ 30x0.8 ■ ФСЛ 40x0.8 ■ Harex 32x1.2

Образующиеся по данным [18, 19] трещины появляются в растворах и бетонах при нагревании и после нагревания, вследствие появления структурных напряжений из-за разности деформаций заполнителей (расширение при нагревании, отсутствие или незначительные деформации после нагревания) и цементного камня (в основном усадка, более значительная после нагревания, чем при нагревании). Механизм образования трещин в бетонах и растворах при нагревании исследован экспериментально и описывается аналитически в работах [18, 19].

Образцы сталефибробетонов (рис. 4) после нагревания при температурах от 110 °С до 400 °С (все составы) и образцы большинства составов сталефибробетонов до 600 °С, как и образцы матрицы уменьшают размеры (получают усадку). Усадка по-разному у различных составов отличается от усадки матрицы без фибры (составляет от 0,1 до 1,8 от усадки матрицы) и не монотонно у многих из них изменяется с ростом температуры нагревания и объемного содержания фибры. У некоторых составов усадка мало изменяется, у других увеличивается, у третьих то увеличивается (уменьшается), то уменьшается (увеличивается) с ростом температуры и объемного содержания фибры. Влияние вида, как и объемного содержания фибры различно при разных температурах у многих составов.

После нагревания при 800 °С и 1100 °С у большинства составов сталефибробетонов с объемным содержанием фибры 0,5 – 1,5% происходит усадка, соизмеримая с усадкой матрицы. Однако у сталефибробетона с 0,5% фибры ФСПВ 30x0,8 происходит расширение 0,02%, а у фибробетонов с 0,5 – 1,5% фибры ФСЛ 40x0,8 усадка составляет всего 0,04-0,05%.

У большинства составов сталефибробетонов с объемным содержанием фибры 3% и 6% после нагревания при 800 °С и 1100 °С вместо усадки происходит увеличение размеров (линейное расширение). Сталефибробетоны с фиброй ФСПВ 15x0,3 увеличивают размеры на 0,35-

0,36% при объемном содержании фибры 3% и на величину 0,6-0,61% при объемном содержании фибры 6%. Сталефибробетоны с фиброй ФСЛ 40x0,8 увеличивают размеры на 0,16 % при объемном содержании фибры 3% и на величину 0,84-0,86% при объемном содержании фибры 6%. Сталефибробетоны с фиброй Narex 32x1,2 имеют усадку 0,11-0,12% при объемном содержании 3%, но расширяются на величину 0,45-0,46% при объемном содержании 6 %. Лишь у сталефибробетонов с фиброй ФСПВ 30x0,8 и при 3%, и 6% фибры наблюдаются усадка на 0,06% после нагревания при 800 и 1100 °С.

Введение стальной фибры как материала с достаточно высоким модулем упругости должно снижать усадку матрицы и сталефибробетонов в целом, так как фибра способна сдерживать усадку матрицы и вызывать в ней образование трещин за счет появления в матрице растягивающих напряжений. Причем, при увеличении объемного содержания фибры, напряжение и объем трещин должны возрастать. Поэтому при введении фибры и с увеличением ее объемного содержания деформации усадки должны уменьшаться, деформации расширения возрастать.

В действительности, судя по полученным результатам исследований, такого однозначного влияния фибры у всех составов сталефибробетонов не наблюдается. Разная фибра и качественно и количественно по-разному влияет на деформации сталефибробетонов после нагревания, а качественное и количественное влияние многих фибр различно при разных значениях объемного содержания фибры (рис. 4). Как и при исследовании процессов снижения массы, это может быть связано с влиянием фибры на структуру, пористость, а также прочность матрицы в составе сталефибробетона при изготовлении и после твердения (неодинаковым при введении различной фибры и разным ее объемном содержании).

Для выявления истинного влияния вида и объемного содержания фибры на изменение размеров сталефибробетонов после нагревания в дальнейшем необходимо провести численный анализ образования в сталефибробетонах трещин, учесть при этом влияние фибры на плотность, изменение массы, свойств, усадку матрицы в составе сталефибробетонов после нагревания.

Полученные результаты до проведения дальнейших исследований позволяют выделить, какие сталефибробетоны (на основе какой фибры и какого ее объемного содержания) получают наименьшие термические изменения размеров и как их следует применять при воздействии следующих температур:

- 110 °С – фибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 3 % и 6 %, фибре Нарех 32×1.2 от 0,5% до 6%, фибре ФСЛ 40×0.8 3 % и 6 %;

- 200 °С – сталефибробетоны на фибре ФСЛ 40×0.8 3 % и 6 %, фибре Нарех 32×1.2 3 % и 6 %;

- 400 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 6%, фибре ФСПВ 15×0.3 6 %, ФСПВ 30×0.8 3% и 6 %, фибре Нарех 32×1.2 6 %;

- 600 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 0,5 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 1,5 %, 6 %;

- 800 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 от 0,5 % до 6 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 1,5 %,

- 1100 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 0,5 %, 3%, 6 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 1,5 %.

После нагревания происходит уменьшение плотности матрицы и фибробетонов. Однако относительные изменения плотности приблизительно равны относительному изменению массы, как основной причины снижения плотности, поэтому в настоящей работе не приводятся. Отклонения от

изменений массы связаны с изменением размеров и составляют не более - 0,6% при усадке и не более +2,5% при расширении после нагревания.

Зависимость относительного изменения прочности при изгибе матрицы, как основы фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания приведены на рис. 5. Зависимость относительного изменения прочности при изгибе сталефибробетонов и их соотношения с изменением прочности матрицы после нагревания до различных температур от содержания и вида фибры приведены на рис. 6.

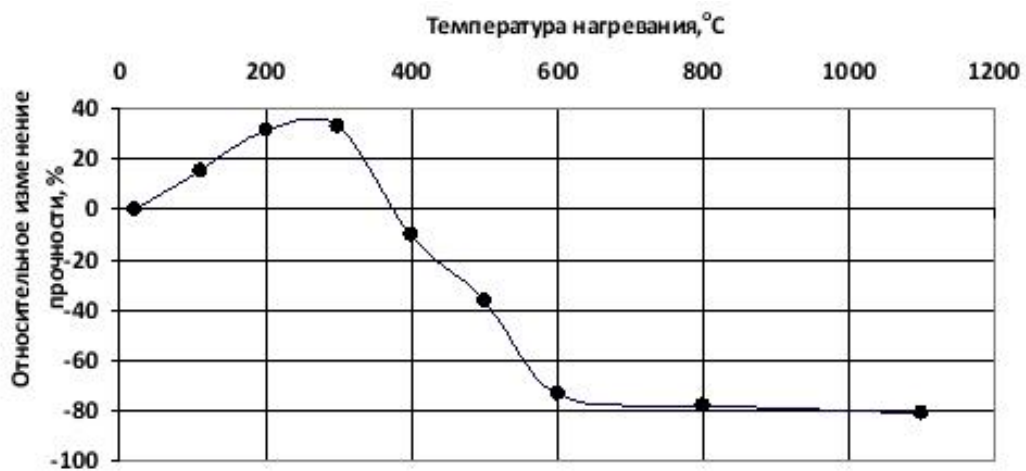


Рис. 5. Зависимость относительного изменения прочности при изгибе матрицы, как основы фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания

Из рис. 5 видно, что у матрицы после нагревания при температурах от 110 до 300 °C прочность монотонно возрастает на величину от 15 % до 33 %. В интервале температур от 300 °C до 600 °C прочность после нагревания постепенно уменьшается на величину до 73% после 600 оC. В интервале температур 600 – 1100 °C дальнейшее изменение прочности стабилизируется при значениях снижения прочности 78 – 81%.

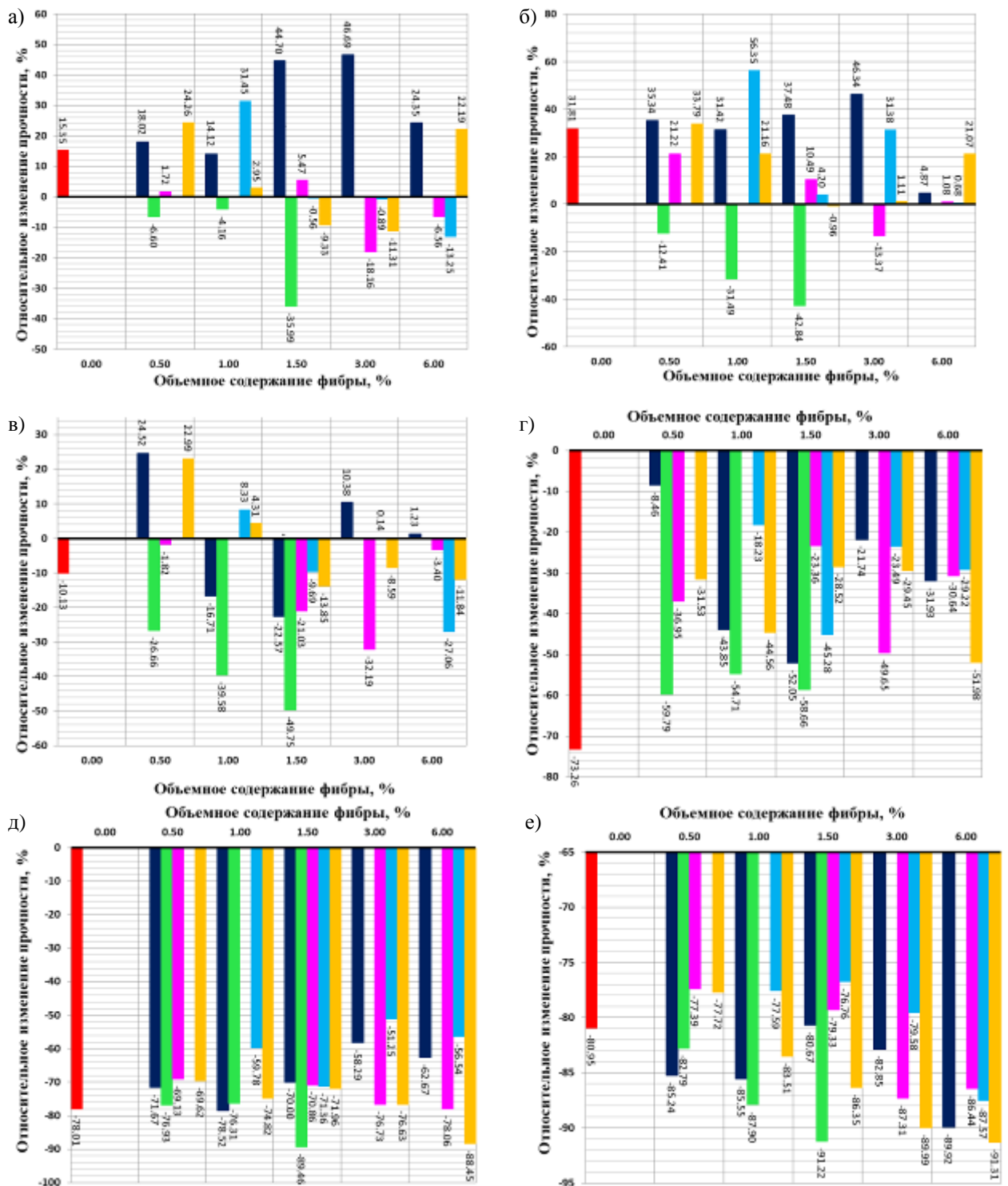


Рис. 6. Зависимость относительного изменения прочности при изгибе фибробетонов и их соотношения с изменением прочности матрицы от содержания и вида фибры после нагревания до различных температур: а - 110 оС, б - 200 °С, в - 400 °С, г - 600 °С, д - 800 °С, е - 1100 °С.

■ матрица ■ ФСПВ 15x0.3 ■ ФСПА 30x0.3 ■ ФСПВ 30x0.8 ■ ФЛ 40x0.8 ■ Harex 32x1.2

Уменьшение прочности матрицы, как раствора, связано с образованием трещин, о которых было сказано при рассмотрении изменения размеров. Однако при температурах до 300 °С образование трещин еще не столь значительно и дополнительное влияние оказывает повышение прочности цементного камня, поэтому прочность при этих температурах повышается. Повышение прочности цементного камня при воздействии температур до 300 °С по данным [20] происходит за счет взаимодействия кремнеземистой тонкодисперсной добавки с гидроксидом кальция по реакции пуццоланизации. Кроме того увеличение прочности цементного камня может быть связано с протеканием при нагревании процессов дополнительной гидратации негидратированной части клинкера в составе цементного камня.

Прочность у различных составов исследованных фибробетонов после нагревания изменяется по-разному. У некоторых составов прочность с ростом температуры и объемного содержания фибры сначала увеличивается, а затем снижается, у других постепенно снижается, у третьих сначала изменяется незначительно, а затем изменяется более существенно с ростом температуры и объемного содержания фибры. Монотонность в изменении прочности с ростом температуры и объемного содержания фибры в большинстве случаев отсутствует. Влияние вида, как и объемного содержания фибры различно при разных температурах у многих составов.

В целом значения относительного изменения прочности фибробетонов по сравнению с относительным изменением прочности матрицы составляют:

- после нагревания при 110 °С от -36% до + 47% по сравнению с +15%;
 - после нагревания при 200 °С от -43% до + 56% по сравнению с +32%;
 - после нагревания при 400 °С от -32% до + 25% по сравнению с -10%;
 - после нагревания при 600 °С от -59% до - 8% по сравнению с -73 %;
 - после нагревания при 800 °С от -89% до - 51% по сравнению с -78%;
 - после нагревания при 1100 °С от -91% до - 77% по сравнению с -81%.
-

Характерно, что после воздействия всех температур, кроме 600 °С относительные изменения прочности отдельных различных составов фибробетонов составляют и меньшую и большую величину, чем относительное изменение прочности матрицы, и в целом соизмеримы с относительными изменениями прочности матрицы. Причем усредненные по всем составам фибробетонов значения изменений их прочности близки к значениям изменения прочности матрицы. Лишь после воздействия температуры 600 °С относительные изменения прочности у всех составов фибробетонов составляют меньшие величины (значит их относительная остаточная прочность выше), чем матрицы.

Образование трещин в матрице фибробетонов за счет появления в ней растягивающих напряжений из-за разницы в термических деформациях фибры и матрицы (образование дополнительных трещин к структурным трещинам матрицы) должно вызывать дополнительное снижение прочности фибробетонов по сравнению с матрицей. Причем при увеличении объемного содержания фибры и температуры нагревания напряжения и объем трещин должны возрастать и вызывать большие изменения прочности. Так как явно и однозначно этого не происходит, можно предположить, что кроме образования трещин происходят процессы нарушения сцепления фибры с матрицей, перераспределение усилий, воспринимаемых матрицей и фиброй, дополнительная гидратация цементного камня матрицы за счет проникновения влаги к негидратированным частям клинкера по образующимся трещинам. Кроме того, объем образовавшихся трещин в различных составах с одинаковым содержанием разной фибры может отличаться и по-разному изменяться с увеличением содержания фибры. Это может быть связано с различиями в деформациях усадки матрицы в разных фибробетонах вследствие влияния вида и объема фибры на плотность, структуру, выделение воды и усадку матрицы в составе фибробетонов.

Для выявления истинного влияния вида и объемного содержания фибры и других факторов на изменение прочности фибробетонов после нагревания, в дальнейшем необходимо провести численный анализ взаимосвязи образования в фибробетонах трещин с соотношением между изменениями прочности фибробетонов и изменением прочности матрицы. Необходимо учесть при этом влияние фибры на плотность, изменение массы, свойств, усадку матрицы в составе фибробетонов после нагревания.

Полученные результаты до проведения дальнейших исследований позволяют выделить, какие сталефибробетоны (на основе какой фибры и какого ее объемного содержания) получают наименьшие термические изменения прочности при изгибе и их следует применять при воздействии следующих температур:

ФСПВ 30×0.8 ФСПВ 15×0.3 ФСП-А 30×0.3 Harex 32×1.2 ФСЛ 40×0.8

- 110 °С – сталефибробетоны на фибре ФСП-А 30×0.3 от 0,5 % до 6 %, фибре Harex 32×1.2 от 0,5% до 6%, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %;

- 200 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 15×0.3 от 0,5 % до 3 %, фибре Harex 32×1.2 0,5 %, 1 % и 6 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 % и 3 %;

- 400 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 0,5 % и 6%, фибре ФСПВ 15×0.3 0,5 %, 3 % и 6 %, фибре Harex 32×1.2 0,5 %, 1,0 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 % и 3 %;

- 600 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 1,5 % и 6 %, фибре ФСПВ 15×0.3 0,5 %, 3 %, и 6 %, фибре Harex 32×1.2 0,5 %, 1,5 % и 3 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 3 %, 6 %;

- 800 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 15×0.3 3 % и 6 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 3 %, 6 %;

- 1100 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 30×0.8 0,5 %, 1,5 %, фибре ФСПВ 15×0.3 1,5 %, фибре Harex 32×1.2 0,5 %, фибре ФСЛ 40×0.8 1 %, 1,5 %, 3 %.

Исследование влияния температуры, вида и объемного содержания фибры на изменение скорости прохождения через образцы ультразвука проводили в связи с тем, что скорость ультразвука для большинства материалов наиболее чувствительна к появлению в материалах трещин, пор и пустот.

Зависимость относительного изменения скорости прохождения ультразвука в матрице, как основе фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания приведены на рис. 7. Зависимость относительного изменения скорости прохождения ультразвука через образцы сталефибробетонов и их соотношения с изменением скорости ультразвука матрицы после нагревания до различных температур от содержания и вида фибры приведены на рис. 8.

Из рис. 7 видно, что у матрицы после нагревания при температурах от 110 до 800 °С скорость прохождения ультразвука монотонно уменьшается на величину до -60%. При этом интенсивность изменения скорости ультразвука невелика до 300 °С, возрастает в интервале температур от 300 до 600 °С, а затем уменьшается в интервале 600 – 800 °С. При дальнейшем увеличении температуры нагревания до 1100 °С степень изменения скорости ультразвука увеличивается не существенно, и достигает -63%.

По-видимому, изменение после нагревания скорости ультразвука у матрицы, как и прочности при изгибе, связано с теми же причинами, описанными выше. Однако влияние пуццоланизации за счет взаимодействия кремнеземистой тонкодисперсной добавки с гидроксидом кальция, а также дополнительной гидратации менее существенно, чтобы компенсировать снижение скорости ультразвука за счет образования трещин. В связи с этим

при температурах до 300 °С, увеличения скорости ультразвука, как прочности не происходит. Наблюдается лишь пониженная интенсивность снижения скорости ультразвука.

Скорость ультразвука, как и прочность при изгибе у различных составов исследованных сталефибробетонов после нагревания изменяется по-разному. У некоторых составов скорость ультразвука с ростом температуры и объемного содержания фибры сначала увеличивается, а затем снижается, у других постепенно снижается, у третьих сначала изменяется незначительно, а затем изменяется более существенно с ростом температуры и объемного содержания фибры. Монотонность в изменении скорости с ростом температуры и объемного содержания фибры в большинстве случаев отсутствует. Влияние вида, как и объемного содержания фибры различно при разных температурах у многих составов.

В целом значения относительного изменения скорости ультразвука по сравнению с относительным изменением скорости ультразвука матрицы составляют:

- после нагревания при 110 °С от -7% до + 0,4% по сравнению с -3%;
- после нагревания при 200 °С от -15% до -3% по сравнению с -5%;
- после нагревания при 400 °С от -30% до - 15% по сравнению с -21%;
- после нагревания при 600 °С от -56% до - 37% по сравнению с -49 %;
- после нагревания при 800 °С от -64% до - 54% по сравнению с -60%;
- после нагревания при 1100 °С от -66% до - 59% по сравнению с -63%.

Характерно, что после воздействия всех температур относительные изменения скорости ультразвука отдельных различных составов фибробетонов составляют и меньшую и большую величину, чем относительное изменение скорости ультразвука матрицы, в целом соизмеримы с относительными изменениями прочности матрицы. Причем

усредненные по всем составам фибробетонов значения изменений скорости ультразвука близки к значениям изменения скорости ультразвука матрицы.

Вместе с тем различия в степени изменений скорости ультразвука у фибробетонов разных составов между собой и от матрицы меньше, чем изменений прочности. Влияние вида и объемного содержания фибры явно незначительно.

По-видимому, при образовании трещин в фибробетоне на участках трещин увеличивается вклад прохождения ультразвука по фибре, что искажает и снижает влияние трещин на скорость прохождения ультразвука.

В связи с этим метод прозвучивания образцов ультразвуком для оценки трещинообразования для фибробетонов является не совсем корректным и не может быть использован для фибробетонов без корректировки и совершенствования.

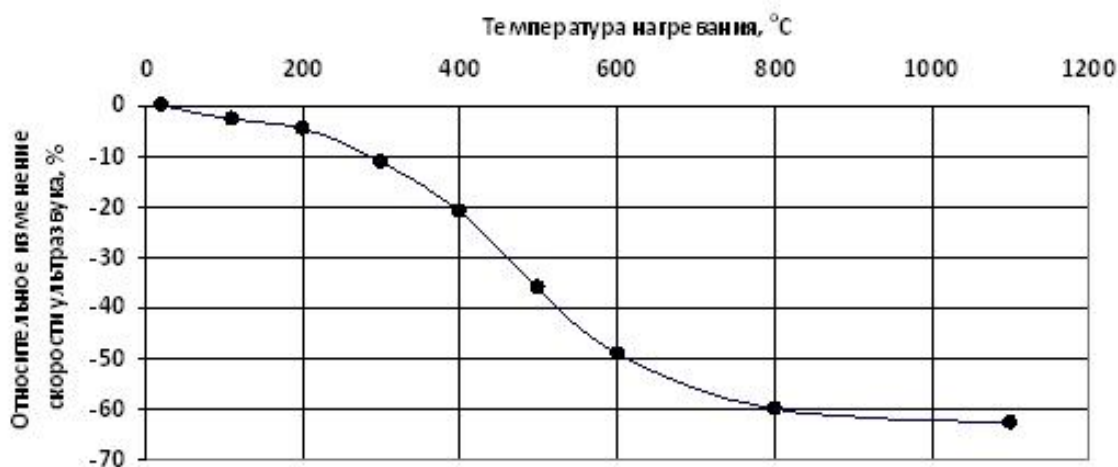


Рис. 7. Зависимость относительного изменения скорости прохождения ультразвука в матрице, как основе фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания

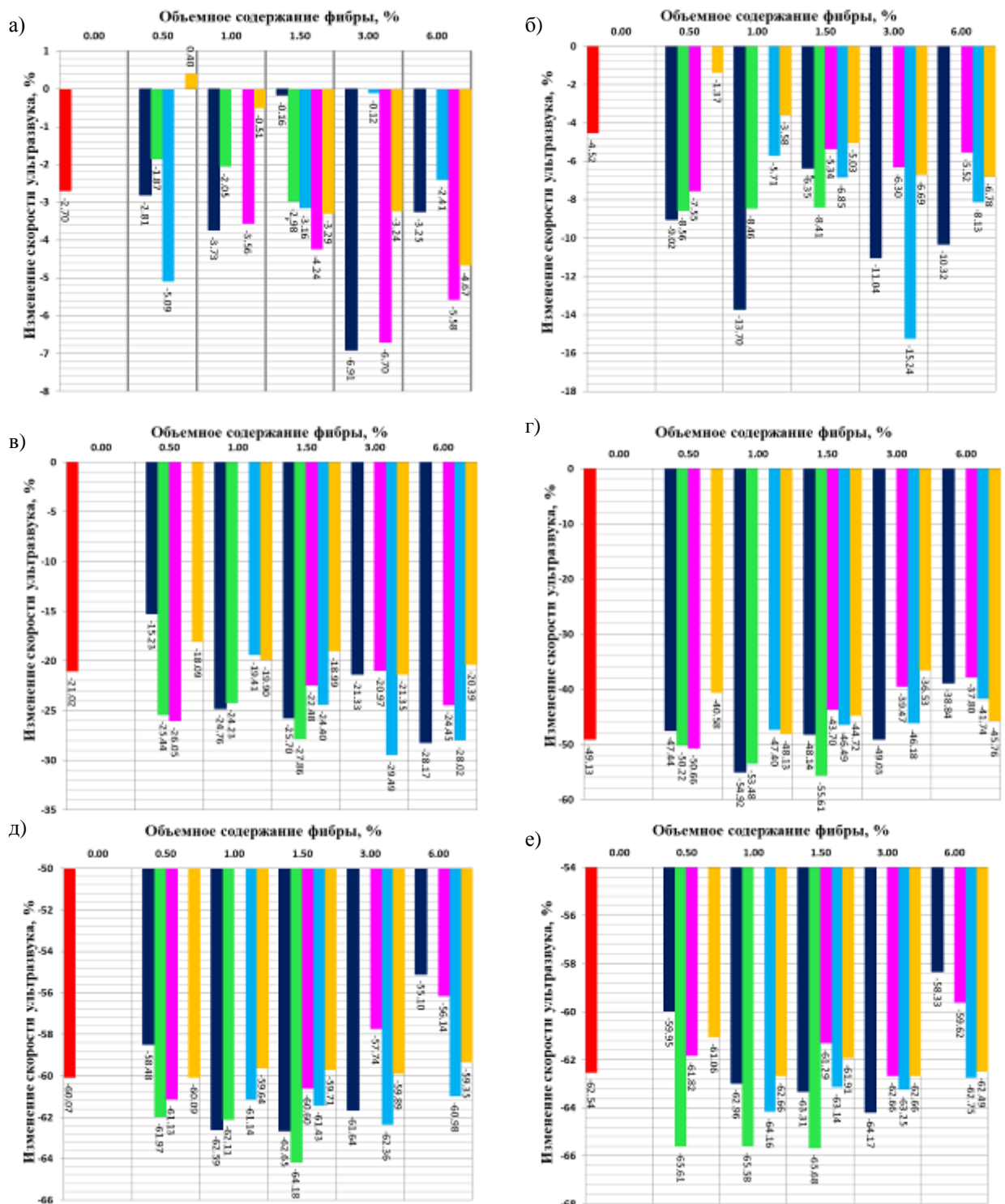


Рис. 8. Зависимость относительного изменения скорости прохождения ультразвука через образцы сталефибробетонов и их соотношения с изменением скорости ультразвука матрицы от содержания и вида фибры после нагревания до различных температур
 а - 110 оС, б - 200 °С, в - 400 °С, г - 600 °С, д - 800 °С, е - 1100 °С.

■ матрица ■ ФСПВ 15x0.3 ■ ФСПА 30x0.3 ■ ФСПВ 30x0.8 ■ ФЛ 40x0.8 ■ Harex 32x1.2

Зависимость относительного изменения водонепроницаемости в матрице, как основе фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания приведены на рис. 9. Зависимость относительного изменения водонепроницаемости и их соотношения с изменением водонепроницаемости матрицы после нагревания до различных температур от содержания и вида фибры приведены на рис. 10.

Из рис. 9 видно, что у матрицы после нагревания в интервале температур 20-110 °С водонепроницаемость не изменяется. В интервале температур от 110 °С до 600 °С водонепроницаемость с ростом температуры приблизительно линейно уменьшается на величину до -90 %. А при температурах 800 °С и 1100 °С изменения водонепроницаемости составляют 100 %.

По-видимому, изменение после нагревания водонепроницаемости у матрицы, как и прочности и скорости прохождения ультразвука, связано с теми же причинами, описанными выше. Однако в данном случае влияния пуццоланизации за счет взаимодействия кремнеземистой тонкодисперсной добавки с гидроксидом кальция, а также дополнительной гидратации достаточно, чтобы компенсировать снижение водонепроницаемости за счет образования трещин только до температуры 110 °С. В связи с этим при более высоких температурах происходят относительные изменения водонепроницаемости более значительные, чем изменения скорости ультразвука и особенно изменения прочности.

Водонепроницаемость, как и прочность при изгибе, и скорость ультразвука у различных составов исследованных сталефибробетонов после нагревания изменяется по-разному. У некоторых составов водонепроницаемость с ростом температуры и объемного содержания фибры сначала увеличивается, а затем снижается, у других постепенно снижается, у третьих сначала изменяется незначительно, а затем изменяется более

существенно с ростом температуры и объемного содержания фибры. Монотонность в изменении скорости с ростом температуры и объемного содержания фибры в большинстве случаев отсутствует. Влияние вида, как и объемного содержания фибры различно при разных температурах у многих составов.

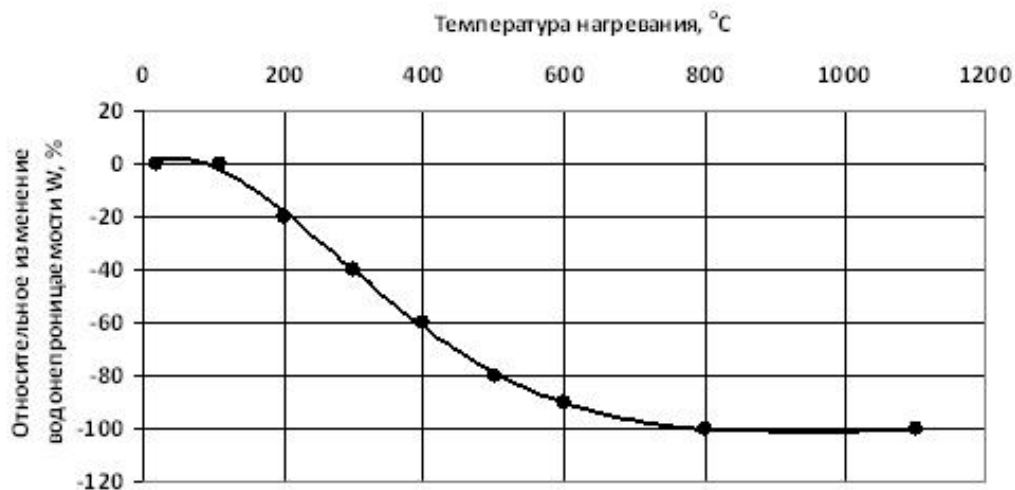


Рис. 9. Зависимость относительного изменения водонепроницаемости в матрице, как основе фибробетонов, после нагревания от температуры нагревания

В целом значения относительного изменения водонепроницаемости по сравнению с относительным изменением водонепроницаемости матрицы составляют:

- после нагревания при 110 °C от 0% до -50% по сравнению с 0 %;
- после нагревания при 200 °C от -10% до -70% по сравнению с -20%;
- после нагревания при 400 °C от -60% до -90% по сравнению с -60%;
- после нагревания при 600 °C от -89% до -95% по сравнению с -90 %;
- после нагревания при 800 °C от -90% до -100% по сравнению с -100%;
- после нагревания при 1100 °C -100% по сравнению с -100%.

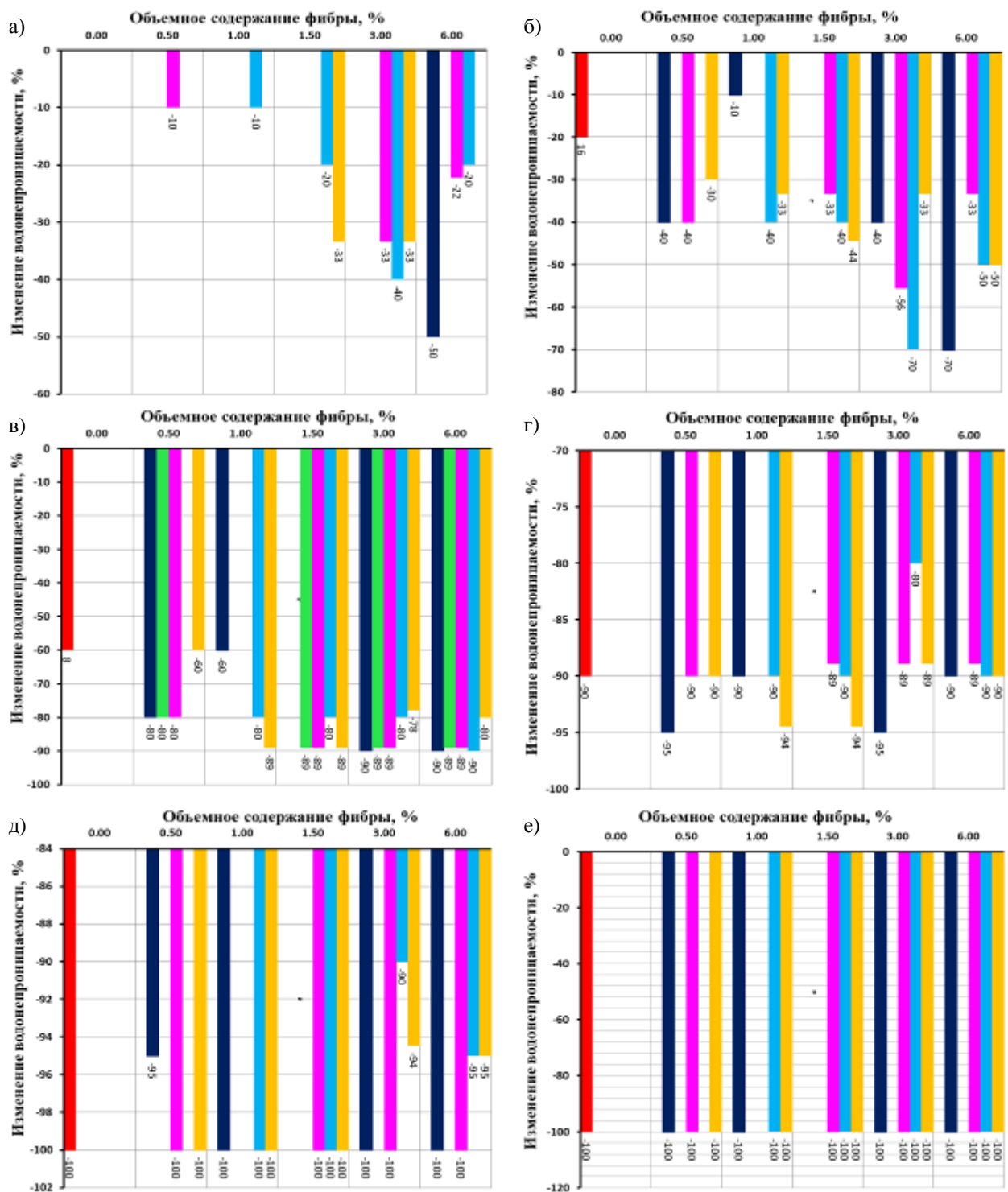


Рис. 10. Зависимость относительного изменения водонепроницаемости сталефибробетонов и их соотношения с изменением водонепроницаемости матрицы от содержания и вида фибры после нагревания до различных температур

а - 110 °C, б - 200 °C, в - 400 °C, г - 600 °C, д - 800 °C, е - 1100 °C.

■ матрица ■ ФСПВ 15x0.3 ■ ФСПА 30x0.3 ■ ФСПВ 30x0.8 ■ ФСЛ 40x0.8 ■ Narex 32x1.2

Таким образом, после нагревания при 110 °С, 200 °С и 400 °С у большинства составов сталефибробетонов происходят более значительные изменения водонепроницаемости, чем у матрицы. По-видимому, это связано с образованием трещин в матрице фибробетонов за счет появления в ней растягивающих напряжений из-за разницы в термических деформациях фибры и матрицы (образование дополнительных трещин к структурным трещинам матрицы).

После нагревания при 600 °С, 800 °С и 1100 °С изменения водонепроницаемости сталефибробетонов близки по величине к изменениям водонепроницаемости матрицы. По-видимому, влияние отмеченного дополнительного растрескивания после нагревания и других процессов на водонепроницаемость сталефибробетонов при этих температурах не существенно, по сравнению с влиянием растрескивания самой матрицы.

При увеличении объемного содержания фибры напряжения и объем трещин должны возрастать и вызывать большие изменения водонепроницаемости. Так как явно и однозначно этого не происходит, можно предположить, что кроме образования трещин происходят процессы дополнительной гидратации цементного камня матрицы за счет проникновения влаги к негидратированным частям клинкера по образующимся трещинам. Кроме того, как и при исследовании изменения прочности, объем образовавшихся трещин в различных составах с одинаковым содержанием разной фибры может отличаться и по-разному изменяться с увеличением содержания фибры. Причина этого описана при обсуждении изменения прочности.

Для выявления истинного влияния вида и объемного содержания фибры и других факторов на изменение водонепроницаемости фибробетонов после нагревания в дальнейшем необходимо провести численный анализ взаимосвязи образования в фибробетонах трещин с отношением между

изменениями водонепроницаемости фибробетонов и изменением водонепроницаемости матрицы. Необходимо учесть при этом влияние фибры на плотность, изменение массы, свойств, усадку матрицы в составе фибробетонов после нагревания.

Полученные результаты до проведения дальнейших исследований позволяют выделить, какие сталефибробетоны (на основе какой фибры и какого ее объемного содержания) получают наименьшие термические изменения водонепроницаемости и их следует применять при воздействии следующих температур:

ФСПВ 30×0.8 ФСПВ 15×0.3 ФСП-А 30×0.3 ФСЛ 40×0.8, Narex 32×1.2

- 110 °С – все рассмотренные составы сталефибробетонов кроме составов на фибре ФСПВ 15×0.3 6%, ФСПВ 30×0.8 3 % и 6 %, ФСЛ 40×0.8 1,5 %, 3 %, 6 %, , Narex 32×1.2 1,5 % и 3 %;

- 200 °С – все рассмотренные составы сталефибробетонов кроме составов на фибре ФСПВ 15×0.3 6 %, ФСПВ 30×0.8 3 %, ФСЛ 40×0.8 3 %, Narex 32×1.2 6 %;

- 400 °С – сталефибробетоны на фибре ФСПВ 15×0.3 1 %, Narex 32×1.2 0,5 %;

- 600 °С – выделить сталефибробетоны с наименьшими изменениями водонепроницаемости не представляется возможным, так как все сталефибробетоны значительно уменьшают водонепроницаемость (на 80 – 95 %).

- 800 °С – выделить сталефибробетоны с наименьшими изменениями водонепроницаемости не представляется возможным, так как все сталефибробетоны значительно уменьшают водонепроницаемость (на 90 – 100 %).

- 1100 °С – выделить сталефибробетоны с наименьшими изменениями

водонепроницаемости не представляется возможным, так как все сталефибробетоны уменьшают водонепроницаемость на 100 %.

Заключение

1. Установлено, что после нагревания происходит снижение массы, и плотности, изменение размеров (в основном уменьшение после 110 – 600 °С и в основном увеличение после 800 – 1100 °С), изменение прочности при изгибе (в основном увеличение после 110 – 300 °С и снижение после 400 – 1100 °С), уменьшение скорости прохождения ультразвука и водонепроницаемости сталефибробетонов.

2. Уменьшение массы и плотности вызвано в основном выделением воды из цементного камня матрицы. Уменьшение размеров вызвано усадкой матрицы при выделении из нее воды, уменьшаемой за счет образования трещин из-за различий термических деформаций цементного камня и песка, а также различий деформаций матрицы и фибры. Увеличение размеров вызвано преобладанием деформаций за счет образования трещин из-за различий термических деформаций матрицы и фибры над деформациями усадки. Увеличение прочности вызвано в основном взаимодействием кремнеземистой тонкодисперсной добавки с гидроксидом кальция по реакции пуццоланизации и возможно протеканием при нагревании процессов дополнительной гидратации. Уменьшение прочности, скорости ультразвука и водонепроницаемости вызвано образованием отмеченных выше трещин.

3. У матрицы, как основы сталефибробетонов, с ростом температуры нагревания происходит:

- постепенное монотонное увеличение степени снижения массы (до - 11,8% после 1100 °С и плотности (до -11,5% после 1100 оС);

- увеличение усадки в интервале температур нагревания от 110 °С (0,11%) до 200 °С (0,14%), незначительное (до 0,17%) увеличение усадки в

интервале температур 200 – 400 °С и уменьшение усадки до 0,15-0,16% в интервале температур 600 – 1100 °С;

- постепенное увеличение прочности при изгибе в интервале температур от 110 до 300 на величину от +15 % до +33 % вследствие взаимодействия кремнеземистой тонкодисперсной добавки с гидроксидом кальция по реакции пуццоланизации и возможно протекания при нагревании процессов дополнительной гидратации негидратированной части клинкера в составе цементного камня;

- постепенное уменьшение прочности при растяжении в интервале температур от 300 °С до 600 °С (до - 73% после 600 °С) и стабилизация изменения прочности при величине -78% ÷ -81%, а в интервале температур 800 – 1100 °С при разрушении некоторых образцов;

- постепенное уменьшение скорости прохождения ультразвука после нагревания при температурах от 110 до 800 °С на величину до -60%. При этом интенсивность изменения скорости ультразвука невелика до 300 °С, возрастает в интервале температур от 300 до 600 °С, а затем уменьшается в интервале 600 – 800 °С. При дальнейшем увеличении температуры нагревания до 1100 °С степень изменения скорости ультразвука увеличивается не существенно, и достигает -63%;

- постепенное уменьшение водонепроницаемости в интервале температур от 110 °С до 600 °С на величину до -90% после 600 °С и снижение на -100 % при температурах 800 °С и 1100 °С.

4. Теоретически изменение массы и плотности фибробетонов должно снижаться с увеличением объемного содержания фибры пропорционально уменьшению относительного содержания матрицы по массе, так уменьшение массы происходит в основном у матрицы. Фактическое уменьшение массы фибробетонов происходит и на меньшую и на большую величину. Причем визуально видимой монотонной закономерности влияния

объемного содержания и вида фибры не наблюдается. По-видимому, это связано с отмеченным в предшествующих публикациях влиянием фибры на структуру и пористость матрицы, в которых было показано, что в большинстве случаев фактическая расчетная плотность цементно-песчаной матрицы в составе сталефибробетона уменьшается с увеличением объемного содержания фибры из-за ее разуплотнения, но по-разному в зависимости от вида фибры. В связи с этим изменение массы и плотности матрицы в составе сталефибробетонов отличается от этих изменений у матрицы без фибры.

5. При введении фибры и с увеличением ее объемного содержания деформации усадки должны уменьшаться, деформации расширения при высоких температурах возрастать, относительное увеличение прочности уменьшаться, а степень снижения прочности, скорости ультразвука и водонепроницаемости увеличиваться. Теоретически с увеличением объемного содержания фибры образование трещин в матрице фибробетонов за счет появления в ней растягивающих напряжений из-за разницы в термических деформациях фибры и матрицы должно увеличиваться, а влияние этих трещин на деформации и изменения свойств фибробетонов должно усиливаться. Однако явно и однозначно этого не происходит, поэтому возможно, что кроме образования трещин происходят процессы нарушения сцепления фибры с матрицей, перераспределение усилий, воспринимаемых матрицей и фиброй, дополнительная гидратация цементного камня матрицы за счет проникновения влаги к негидратированным частям клинкера по образующимся трещинам. Кроме того из-за указанного выше влияния фибры на структуру и пористость матрицы, изменение свойств матрицы в составе сталефибробетонов отличается от этих изменений у матрицы без фибры.

6. Судя по полученным данным, различия в степени изменений

скорости ультразвука у фибробетонов разных составов между собой и от матрицы меньше, чем в степени изменений прочности и водонепроницаемости. Влияние вида и объемного содержания фибры явно незначительно. По-видимому, при образовании трещин в фибробетоне на участках трещин увеличивается вклад прохождения ультразвука по фибре, что искажает и снижает влияние трещин на скорость прохождения ультразвука. В связи с этим метод прозвучивания образцов ультразвуком для оценки трещинообразования для фибробетонов является не совсем корректным и не может быть использован для фибробетонов без корректировки и совершенствования.

7. Для выявления истинного, не маскируемого другими процессами, влияния вида и объемного содержания фибры и других факторов на термические изменения свойств фибробетонов после нагревания в дальнейшем необходимо провести численный анализ взаимосвязи образования в фибробетонах трещин с соотношением между деформациями усадки и расширения, изменениями массы, плотности, прочности, модуля упругости и водонепроницаемости фибробетонов и соответствующими изменениями матрицы. Необходимо учесть при этом влияние фибры на плотность, изменение массы, свойств, усадку матрицы в составе фибробетонов после нагревания.

8. Полученные в работе результаты до проведения дальнейших исследований позволили выделить, какие сталефибробетоны (на основе какой фибры и какого ее объемного содержания) получают наименьшие термические изменения размеров, прочности при изгибе, водонепроницаемости и следует применять при воздействии различных температур.

Литература

1. Рабинович. Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Монография. М.: Издательство АСВ, 2011. 642 с.
2. Страданченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. Разработка эффективных составов фибробетона для подземного строительства.// Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1995
3. Маилян А.Л., Айвазян Э.С., Маилян Л.Р. Расчетная оценка прочностных и деформативных характеристик и диаграмм деформирования фибробетонов с агрегированным распределением волокон // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1760
4. Красновский Р.О., Денисов А.В., Рогачев К.В. Фибробетон - новый материал для строительства АЭС. Энергетик № 12, 2013. с.46-47
5. Стиховин В.Е., Распопов С.И. Опыт изготовления сталефибробетонных изделий для атомной промышленности. URL:tehnobeton.ru/category/tb-9-10-2018-26-28.
6. Lau. A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses. The Hongkong polytechnic university, 2003. URL:hdl.handle.net/10397/3456.
7. Clotilda Petrus, Huurun Ain Azharb, Goh Lyn Deea, Ruqayyah Ismaila, Anizahyati Alisibramulisi. Compressive strength of concrete with fibres at elevated temperature //Journal Technology (Sciences & Engineering). 2016. 78:5–4. P. 71–74.
8. Jihwan Kim, Gyu Pil Lee, Do Young Moon Evaluation of mechanical properties of steel-fibrereinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test. Construction and BuildingMaterials, 79,2015. Pp.182–191.

9. Sideris K. K., Manita P., Papageorgiou A. and Chaniotakis E. Mechanical Characteristics of HighPerformance Fibre Reinforced Concretes at Elevated Temperatures ACI Special Publication, v.212, ,06.01.2003. Pp.973-988.

10. Deepthy. S. Nair Performance of steel fiber reinforced concrete under elevated temperature. Journal ofMechanical and Civil Engineering, Volume 13, Issue 3, Ver. II, May- Jun. 2016, Pp. 13-17.

11. Aminuddin Jamerana,, Izni S. Ibrahima, Siti Hamizah S. Yazana, Siti Nor A. A. Rahim Mechanicalproperties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. The 5thInternational Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering125,(2015. Pp.818 – 824

12. Степанов В.Г., Степанюченко В.С. Обеспечение огнестойкости железобетонных строительныхконструкций. Строительство и архитектура Архитектурные решения объектов строительстваи реконструкции. 2008.

13. Wasan I. Khalil Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete, Journal ofEngineering and Development, Vol. 10, No. 2, June 2006.

14. Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung Mechanical properties of steel fiber reinforcedreactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. NuclearEngineering and Design. 2011.

15. Дорф В. А., Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П.С. Влияние характеристик стальной фибры и ее содержания в сталефибробетоне на его огнестойкость // Вестник гражданских инженеров. 2017. №5(64).С.38-46.

16. Красновский Р. О., Капустин Д. Е., Султыгова П.С., Травкин П.В., Влияние высоких температур на изменение плотности, массы и линейных размеров сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2019. №2(73).С.112-121.

17. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Влияние стальной фибры на плотность цементно-песчаной матрицы в составе сталефибробетона для АЭС// Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Сборник докладов Первой Национальной конференции. Издательство: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва) 2020.

18. Денисов А. В., Дубровский В. Б., Соловьев В. Н. Радиационная стойкость минеральных и полимерных строительных материалов. М.: «Издательский дом МЭИ». 2012. 284 с.

19. Музалевский Л.П. Радиационные изменения тяжелых бетонов и метод их аналитического определения: дисс... канд. техн. наук. 05.23.05. М., 1989. 240 с.

20. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Султыгова П.С. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов.// Вестник гражданских инженеров. 2017. №2(61). С. 178-183.

References

1. Rabinovich. F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstrukcii. [Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction]. Monografiya. M.: Izdatel'stvo ASV, 2011. 642 p.

2. Stradanchenko S.G. Pleshko M.S. Armejskov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1995

3. Mailjan A.L. Ajvazjan Je.S. Mailjan L.R. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1760

4. Krasnovskij R.O., Denisov A.V., Rogachev K.V. Energetik. 2013. No 12, P.46-47.

5. Stihovin V.E., Raspopov S.I. Kompozit XXI vek. URL:tehnobeton.ru/category/tb-9-10-2018-26-28
 6. Lau. A. Effect of high temperatures on normal strength concrete and high performance concrete containing steel fibers: Dissertation theses. The Hongkong polytechnic university, 2003. URL:hdl.handle.net/10397/3456.
 7. Clotilda Petrus, Huurun Ain Azharb, Goh Lyn Deea, Ruqayyah Ismaila, Anizahyati Alisibramulisi. Journal Technology (Sciences & Engineering). 2016. 78:5–4. P. 71–74.
 8. Jihwan Kim, Gyu Pil Lee, Do Young Moon. Construction and Building Materials. 2015. №79. Pp. 182–191.
 9. Sideris K. K., Manita P., Papageorgiou A. and Chaniotakis E. ACI Special Publication. 2003. № 212. Pp.973-988.
 10. Deepthy S., Nair K. Journal of Mechanical and Civil Engineering. May- Jun. 2016, Volume 13, Issue 3, Ver. II. Pp. 13-17.
 11. Aminuddin Jamerana, Izni S. Ibrahima, Siti Hamizah S. Yazana, Siti Nor A. A. Rahim. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), Procedia Engineering 125, 2015. Pp.818 – 824
 12. Stepanov V.G., Stepanyuchenko V.S. Obespechenie ognestojkosti zhelezobetonnyh stroitel'nyhkonstrukcij. Stroitel'stvo i arhitektura Arhitekturnye resheniya ob"ektov stroitel'stvai rekonstrukcii. 2008.
 13. Wasan I. Khalil. Journal of Engineering and Development, Vol. 10, No. 2, June 2006.
 14. Yuh-Shiou Tai, Huang-Hsing Pan, Ying-Nien Kung Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 °C. Nuclear Engineering and Design. 2011.
 15. Dorf V. A., Krasnovskij R. O., Kapustin D. E., Sulygova P.S. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2017. No 5(64). Pp.38-46.
-



16. Krasnovskij R. O., Kapustin D. E., Sulygova P.S., Travkin P.V., Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2019. No 2(73).Pp.112-121.

17. Denisov A.V., Zaitsev D.V. Aktual'nye problemy stroitel'noj otrasli i obrazovaniya. Sbornik dokladov Pervoj Nacional'noj konferencii. Izdatel'stvo: Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet (Moskva) 2020.

18. Denisov A.V., Dubrovskiy V.B., Solovev V.N. Radiatsionnaya stoykost mineralnyh i polimernyh stroitel'nyh materialov [Radiating stability of mineral and polymeric building materials]. Moskva: Izdatelskiy dom MEI, 2012. 284 p.

19. Muzalevskiy L.P. Radiatsionnye izmeneniya tyazhelyh betonov i metod ih analiticheskogo opredeleniya [Radiating changes of heavy concrete and method of their analytical definition]. Dissertaciya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. [Candidate of technical sciences (PhD) dissertation]. 05.23.05. Moskva, 1989. 240 p.

20. Dorf V.A., Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Sulygova P.S. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2017. No 2(61). Pp. 178-183.